



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**VÝVOJ VENTILAČNÍCH TURBÍN**

DEVELOPMENT OF VENTILATING TURBINES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jiří Křupka**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.**

**BRNO 2017**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Bc. Jiří Křupka**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Vývoj ventilačních turbín

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Konstrukční vývoj alternativních stavebnicových mechanických systémů ventilačních větrných turbín včetně výběru důležitých výpočtů.

### Cíle diplomové práce:

Vypracovat rozsáhlou rešeršní zprávu zaměřenou na historii a vývoj konstrukcí větrných turbín, na světové i jednotlivé výrobce ventilačních turbín, ventilačních hlavíc a příslušenství.

Vytvářet 3D modely alternativních stavebnicových regulovatelných ventilačních turbín dle podkladů vedoucího diplomové práce.

Vytvořit systém výpočtu tvarů lopatek vzhledem k proudění vzduchu.

### Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 9788021426290.

BIGOŠ, Peter, Jozef KULKA, Melichar KOPAS a Martin MANTIČ. Teória a stavba zdvíhacích a dopravných zariadení. Vyd. 1. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2012. Edícia vedeckej a odbornej literatúry (Technická univerzita v Košiciach). ISBN 9788055311876.

POLÁK, Jaromír, Jiří PAVLISKA a Aleš SLÍVA. Dopravní a manipulační zařízení I. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 8024800438.

KOVÁČ, Milan a Vladimír KLAPITA. Manipulácia s materiálom v doprave. 1. vyd. V Žiline: EDIS, 2003. ISBN 8080701741.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 1. vyd. Úvaly: Albra, 2003. ISBN 8086490742.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce řeší konstrukční vývoj alternativních stavebnicových mechanických systémů ventilačních turbín. Práce se v rešeršní části zabývá problematikou dopravovaného média-vzduchu a ventilace, dále pak funkcí, konstrukcí ventilačních turbín a nakonec obsahuje přehled ventilačních turbín světových výrobců, které slouží k odvětrávání rezidenčních, komerčních, průmyslových či zemědělských staveb přirozeným nebo hybridním způsobem ventilace. Konstrukční - návrhová část práce je zaměřena na tvorbu 3D modelů vybraných typů alternativních stavebnicových regulovatelných ventilačních turbín dle podkladů vedoucího diplomové práce a dále pak na vytvoření systému výpočtu tvarů lopatek vzhledem k proudění vzduchu pro přídatný axiální ventilátor ventilačních turbín. Za tímto účelem byla vytvořena vlastní softwarová aplikace VENTILATOR (GUI) umožňující pružnou změnu vstupních parametrů výpočtu a tím rychlou úpravu tvaru křivky 3D modelu lopatky axiálního ventilátoru.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Ventilační turbína, vzduch, ventilace, 3D model, lopatka, axiální ventilátor, softwarová aplikace

## ABSTRACT

This Master thesis solves a construction development of alternative modular mechanical systems for ventilation turbines. A research part of the thesis deals with the issues of transported medium (air) and ventilation, as well as functions, designs of ventilation turbines, and finally it provides an overview of ventilation turbines produced by manufacturers worldwide; these are used for ventilation of residential, commercial, industrial or agricultural structures using the natural or hybrid ventilation. A construction - design part is focused on creating 3D models of selected alternative modular adjustable ventilation turbines according to the data provided by the thesis supervisor and then on establishing a system for calculating the shapes of blades relative to the airflow for additional axial fan of ventilation turbines. For this purpose, a customized software application VENTILATOR (GUI) was developed to allow a flexible change of input calculation parameters and thus a fast modification of the curve shape in the 3D model of the axial fan blade.

## KEYWORDS

Ventilation turbine, air, ventilation, 3D model, blade, axial fan, software application

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŘUPKA, J. *Vývoj ventilačních turbín*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 102 s. Vedoucí diplomové práce Jiří Malášek.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Maláška, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Bc. Jiří Křupka

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Maláškovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a připomínky při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat za rady: Ing. Martinu Jonákovi, Ing. Josefu Klimešovi a PhDr. Zuzaně Svobodové.

## OBSAH

Úvod .....	10
1 Ventilací turbíny .....	11
1.1 Dopravované médium ventilačních turbín a jeho složky.....	11
1.1.1 Suchý vzduch.....	11
1.1.2 Voda a vodní pára.....	12
1.1.3 Vlhký vzduch.....	13
1.1.4 Pojmy.....	13
1.2 Klimatické změny působící na ventilační turbíny .....	14
1.3 Ventilace .....	15
1.3.1 Požadavky na ventilační systémy .....	16
1.3.2 Kvalita odpadního a odváděného vzduchu.....	18
1.4 Funkce ventilační turbíny .....	19
1.5 Historie ventilačních turbín .....	20
1.6 Konstrukce ventilačních turbín .....	20
1.7 Přehled výrobců ventilačních turbín .....	23
1.7.1 Lomanco .....	23
1.7.2 Edmonds .....	26
1.7.3 VYTOZ-EKO .....	31
1.7.4 H-tech group .....	32
1.7.5 Příslušenství ventilačních turbín.....	33
2 Modelová 3D dokumentace ventilačních turbín.....	36
2.1 Model Edmonds Hurricane .....	36
2.1.1 Díly sestavy .....	37
2.1.2 Mechanická regulace „čtvrt-klapkou“ .....	43
2.1.3 Mechanická regulace „půl-klapkou“ .....	45
2.1.4 Sestava Edmonds hurricane.....	55
2.2 Model VYTOZ-EKO ZLT.....	57
2.2.1 Díly sestavy .....	57
2.2.2 Mechanická regulace „čtvrt-klapkou“ .....	59
2.2.3 Mechanická regulace „půl-klapkou“ .....	60
2.2.4 Sestava VYTOZ-EKO .....	60
3 Návrh systému výpočtu tvarů lopatek .....	62
3.1 Návrh axiálního ventilátoru ventilační turbíny .....	62
3.1.1 Teorie axiálních ventilátorů.....	62
3.1.2 Výpočet axiálního ventilátoru ventilační turbíny .....	66



3.1.3	3D model axiálního ventilátoru ventilační turbíny.....	77
3.2	Softwarová aplikace VENTILATOR .....	79
3.2.1	Úvod, cíl a popis aplikace.....	79
3.2.2	Podrobný popis aplikace.....	80
	Závěr.....	89
	Použité informační zdroje.....	90
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	93
	Seznam obrázků:.....	97
	Seznam grafů: .....	100
	Seznam tabulek:.....	101
	Seznam příloh .....	102

## ÚVOD

Návrh ventilace byl již od pradávna jednou z nedílných součástí technických požadavků kladených na tehdejší dobové stavitele při stavbě „moderních“ objektů. Tento požadavek byl spojen jednak s okolním přírodním klima, které během roku na dané lokaci dominantně panovalo, ale také s neustále po staletích rozvíjející se lidskou činností v interiérech různorodých staveb. Pod touto lidskou činností si lze například představit provoz historických kuchyní, lázní nebo prostor s vysokou koncentrací osob - divadel atd. Historicky byla ventilace řešena jako pasivní (např. otevírání oken, netěsnosti stavby) nebo přirozená (větrání přiváděcími a odváděcími otvory - využití komínového efektu).

Počátky vědního zkoumání dostatečného průtoku vzduchu a množství škodlivin jím obsažené v daném prostoru se podle dostupných zdrojů datují už do počátku 16. století. Hlavní rozmach však nastal až v 19. století a později v 20. století mimo jiné díky průmyslové revoluci. Tehdy byly poprvé stanoveny stupnice pro minimální hodnoty průtoku vzduchu na osobu dle *Tredgolda* (1835). Následovali jej stupnice dle *Billings*, *Flugge*, *ASHVE*. Dále se vědci zaměřili na „škodlivou“ složku, kterou obsahuje odpadní vzduch a to na podíl  $CO_2$ . Výchozím podkladem při stanovení dávky čerstvého vzduchu pro osoby v prostoru větraném venkovním vzduchem je podmínka, kterou stanovil *Max von Pettenkofer*, německý chemik a lékař v roce 1877, že koncentrace oxidu uhličitého  $CO_2$  ve vnitřním vzduchu nemá překročit 0,1 % [obj], tzv. (Pettenkoferovo číslo). [26], [41]

V dnešních moderních a novodobých obytných i průmyslových budovách jsou požadavky na způsob větrání, požadovaný průtok vzduchu, množství škodlivin  $CO_2$  a další parametry stanoveny jak technickými normami, tak právními předpisy a vládními nařízeními příslušného státu a jeho orgánů. Dnešní trh v oblasti *techniky prostředí*, nabízí široký sortiment celosvětové produkce technických zařízení.

Technická zařízení v oboru techniky prostředí je možné rozdělit podle účelu na zařízení větrací, klimatizační a vytápěcí. Naprostá většina těchto moderních zařízení zajišťuje lidem pohodu prostředí. [12] Ventilaci lze definovat jako řízenou výměnu vzduchu v uzavřeném prostoru.

Ventilační turbíny neboli rotační ventilační hlavice jsou součástí skupiny vzduchotechnických zařízení, která slouží k průběžnému odvětrávání interiérů staveb, jako jsou rodinné domy (např. půdy, sklepy, koupelny atd.), průmyslové výrobní a skladovací haly, garáže a různorodé zemědělské objekty. Lze je též použít pro odvětrávání šachet panelových domů, kde jsou umístěny na vyústění z ventilační šachty. Obecně lze říci, že jejich použití je vhodné všude tam, kde požadavek na pravidelnou výměnu vzduchu je nepostradatelným faktorem.

Jednou z hlavních výhod použití ventilačních turbín např. oproti ventilátorům je úspora elektrické energie pro konání rotačního pohybu, neboť ventilační turbína jako zdroj energie tohoto pohybu využívá meteorologický jev - vítr. Vítr je vektor popisující pohyb zvolené částice vzduchu v určitém místě atmosféry v daném okamžiku.

Další hlavní výhodou je relativní jednoduchost konstrukce, která umožňuje v některých případech samotnému uživateli výměnu jednoho z nejdůležitějších komponentů turbíny, kterým je ložisko. Za výhodu při použití turbíny lze též považovat její tichý chod, mimo jiné díky odlehčené konstrukci turbíny např. oproti použití, často hlučného centrálního elektrického ventilátoru v panelových domech. Lopatky ventilační turbíny vzhledem ke svému aerodynamickému tvaru zajišťují pro turbínu dobrou účinnost i při malé rychlosti větru. Následující kapitola je věnována technickým zařízením - *ventilačním turbínám*.

# 1 VENTILAČNÍ TURBÍNY

Tato kapitola tvoří rešeršní zprávu zaměřenou na pojednání o dopravovaném médiu ventilačních turbín, klimatických změnách působících na turbíny, ventilaci budov, historii a funkci ventilačních turbín, jejich konstrukčních součástech. Dále kapitola obsahuje přehled vybraných světových výrobců ventilačních turbín, jejich produkce a příslušenství. Ukázka z aplikace ventilačních turbín je zobrazena na Obr. 2. Na Obr. 1 je pak zobrazena samotná ventilační turbína. [28], [32], [35], [37]



Obr. 1 Ventilační turbína [30]



Obr. 2 Aplikace ventilační turbíny [30]

## 1.1 DOPRAVOVANÉ MÉDIUM VENTILAČNÍCH TURBÍN A JEHO SLOŽKY

Vlhký vzduch je typickým představitelem směsí plynů a par. Jeho studiem lze získat představu o tom, jak se chovají směsi plynů a par vzájemně chemicky netečných při různých dějích.

V technické praxi je mnoho soustav, které používají směsi tvořené ideálními plyny<sup>1</sup> a parou. Jednou z nich je směs suchého vzduchu a vodní páry nazývaná vlhký vzduch.

Takovou směsí je atmosférický vzduch, který nás obklopuje a který je pracovní látkou v řadě zařízení. Zvláštností směsi plynů a par je, že jedna její složka a to pára může kondenzovat<sup>2</sup>.

Vlhký vzduch je tedy směsí suchého vzduchu a vody. Vodu obsahuje ve formě přehřáté nebo syté vodní páry, kapalně vody nebo jinovatky.

Pro zjednodušení fyzikálního popisu vlhkého vzduchu, s nímž se setkáváme v přírodě nebo v technických procesech, se omezujeme pouze na uvedené dvě složky a to suchý vzduch a vodu. Přítomnost dalších látek - různé plynné, kapalně nebo tuhé příměsi či znečišťující látky neuvažujeme.[12]

### 1.1.1 SUCHÝ VZDUCH

Suchý vzduch je směsí inertních<sup>3</sup> plynů. Při běžných atmosférických podmínkách se svými vlastnostmi se blíží chování ideálního plynu resp. nedokonalého plynu, poněvadž

<sup>1</sup> Ideální plyn je dokonale stlačitelný a bez vnitřního tření. Ideální plyn je popsán stavovou rovnicí ideálního plynu ve tvaru:  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ , kde  $p$  je tlak plynu [Pa],  $V$  objem plynu [ $m^3$ ],  $n$  je látkové množství [mol] a  $T$  je absolutní teplota [K]. Veličina  $R$  je konstanta, která se nazývá univerzální plynová konstanta a má pro všechny plyny stejnou hodnotu.  $R = 8,3144 [J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$ . [12]

<sup>2</sup> Kondenzace neboli kapalnění je termodynamický proces ochlazování, při kterém probíhá změna vodní páry v kapalinu odvodem tepla  $Q$ . [12]

měrné tepelné kapacity  $c$  se s teplotou mění. Avšak v rozmezí teplot ( $-30 \div 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) považujeme měrné tepelné kapacity za konstantní.

Standartní objemové složení suchého vzduchu ve spodních vrstvách atmosféry je uvedeno v Tab. 1<sup>4</sup>, kde jsou vybrány složky s nejvyšším procentuálním podílem. V Tab. 2 jsou uvedeny základní fyzikální veličiny pro suchý vzduch. [12], [4]

Tab. 1 Složení suchého vzduchu [12]

Plyn	Dusík $N_2$	Kyslík $O_2$	Argon $Ar$	Oxid uhličitý $CO_2$
Objemové složení [%]	78,09	20,95	0,93	0,03

Tab. 2 Základní fyzikální veličiny pro suchý vzduch [12], [4]

Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotka
Střední zdánlivá molární hmotnost	$M$	28,964	$[kg \cdot kmol^{-1}]$
Měrná plynová konstanta	$r$	287,062	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
Hustota suchého vzduchu	$\rho_{sv}$	1,21	$[kg \cdot m^{-3}]$
Měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	$c_p$	1010	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

### 1.1.2 VODA A VODNÍ PÁRA

Stavové rovnice vody a vodní páry jsou podstatně vzdáleny stavové rovnici ideálního plynu. V atmosférickém vzduchu za běžných podmínek však má parciální tlak vodní páry  $p_p$  nízké hodnoty (do  $1 \text{ kPa}$ ) a za těchto podmínek se vodní pára obsažená ve vlhkém vzduchu svými vlastnostmi blíží chování nedokonalého plynu. Vybrané základní fyzikální hodnoty pro vodní páry jsou uvedeny v Tab. 3 dle [12], [4].

Tab. 3 Základní fyzikální hodnoty pro vodní páru [12], [4]

Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotka
Střední zdánlivá molární hmotnost	$M$	18,015	$[kg \cdot kmol^{-1}]$
Měrná plynová konstanta	$r$	461,528	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
Hustota vodní páry	$\rho_{vp}$	1000	$[kg \cdot m^{-3}]$
Měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	$c_p$	4190	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

<sup>3</sup> Inertní plyny neboli netečné plyny jsou plyny, které za daných podmínek nepodléhají chemickým reakcím. Patří sem zejména dusík a vzácné plyny. Vzácné plyny ležící v pravém sloupci periodické soustavy prvků jsou  $He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn$ . Některé z těchto plynů se používají při svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře (plynu) metodou MIG (Metal Inert Gas). Jako například helium ( $He$ ) nebo argon ( $Ar$ ). [12], [3], [5]

<sup>4</sup> V suchém vzduchu kromě zmíněných prvků se dále vyskytují v malých množstvích:  $He, Kr, Xe, H_2, O_3$ . [12]

### 1.1.3 VLHKÝ VZDUCH

Ve vlhkém vzduchu, který obsahuje přehřátou vodní páru je parciální tlak vodních par ve směsi nižší než syté vodní páry při dané teplotě vzduchu a vzduch je nenasycený vlhkostí.

Jestliže parciální tlak vodní páry  $p_p$  ve vzduchu dosáhne hodnoty tlaku syté páry  $p_p''$  při dané teplotě vzduchu, dostáváme vzduch nasycený vlhkostí, který obsahuje suchý vzduch a sytou vodní páru. Hodnotou parciálního tlaku sytých par  $p_p''$  je určeno množství vlhkosti, které je vzduch při dané teplotě schopen pojmout ve formě páry. V nasyceném vlhkém vzduchu je obsaženo maximální množství vodní páry.

V obou případech pro nenasycený i nasycený je vlhký vzduch homogenní směsí, analogickou směsí plynů.

Obsahuje-li vlhký vzduch větší množství vlhkosti než odpovídá nasycenému vzduchu, nadbytečná vlhkost se vysráží. Při teplotě  $t \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  se vysráží ve formě kapiček syté kapaliny (vodní mlhy) a při teplotě  $t \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve formě ledových krystalků, jinovatky či sněhu (ledové mlhy) a dostáváme vzduch přesycený vlhkostí, nazývaný také mlhový vzduch. Při teplotě  $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  může přesycený vzduch obsahovat obě zkondenzované fáze-vodní i ledovou mlhu. Vzduch přesycený vlhkostí je heterogenní směs dvoufázová resp. třífázová. Za běžných podmínek se z atmosférického vzduchu vodní kapky nebo ledové krystalky působením tíhového zrychlení  $g$  postupně usazují.

Vzhledem k tomu, že vlhký vzduch se uplatňuje zpravidla při atmosférickém tlaku<sup>5</sup>  $p_A$  a při teplotách  $t$  blízkých našemu okolí je možné jeho složky, suchý vzduch i vodní páru považovat při praktických výpočtech za nedokonalé plyny.

K získání podrobnějších informací o dané problematice suchého, vlhkého vzduchu a vodní páry je vhodné studium dalších informačních pramenů např. literatury [12].

### 1.1.4 POJMY

Tato kapitola obsahuje přehled důležitých pojmů termomechaniky z předešlých kapitol 1.1.1-1.1.3 dle [12] a [3].

#### 1.1.4.1 IDEÁLNÍ PLYNY

Řídí se zákony ideálních plynů. Jedná se o hmotné body, dokonale elastické, které mají nulový objem  $V$ , nepůsobí na sebe přitažlivými ani odpudivými silami a jsou v neustálém neuspořádaném pohybu. Fyzikální vlastnosti ideálních plynů jsou konstantní.

#### 1.1.4.2 NEDOKONALÉ PLYNY

Řídí se zákony ideálních plynů jen přibližně. Fyzikální vlastnosti nedokonalých plynů bývají mírně závislé na teplotě  $t$ .

#### 1.1.4.3 REÁLNÉ PLYNY

Neřídí se zákony ideálních plynů. Fyzikální vlastnosti reálných plynů jsou výrazně závislé na teplotě  $t$  a tlaku  $p$ .

---

<sup>5</sup> Atmosférický neboli barometrický tlak, kterému je definitoricky přisouzena hodnota  $p_A = 101\,325\text{ [Pa]}$ , je tlakem našeho okolního atmosférického prostředí. Nejvyšší hodnota atmosférického tlaku  $p_A$  je u hladiny moře a s rostoucí nadmořskou výškou atmosférický tlak postupně klesá. [3]

#### 1.1.4.4 MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA

U stlačitelných látek plynů a par platí:

- a) Měrná tepelná kapacita při přenosu tepla za konstantního tlaku  $c_p [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
- b) Měrná tepelná kapacita při přenosu tepla za konstantního objemu  $c_v [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

Jelikož za různých okrajových podmínek je pro stejný rozdíl teplot nutné dodat či odebrat různé množství tepla  $Q$ .

#### 1.1.4.5 SYTÁ KAPALINA

Teplota kapaliny roste při izobarickém<sup>6</sup> ohřevu. Jakmile dosáhne kapalina teploty rovné teplotě varu za daného tlaku, je ohřev ukončen. Tato kapalina, jejíž teplota je rovna teplotě varu za daného tlaku, se nazývá sytá kapalina.

#### 1.1.4.6 SYTÁ VODNÍ PÁRA

Přivedením tepla  $Q$  k syté kapalině, teplota se nemění, dokud se veškerá kapalina nepřemění v páru. V okamžiku, kdy vypařování právě skončilo, v nádobě se nachází pouze pára o teplotě rovné teplotě varu za daného tlaku. Pára v tomto stavu se nazývá sytá pára.

#### 1.1.4.7 PŘEHŘÁTÁ VODNÍ PÁRA

Přívodem tepla  $Q$  syté páře stoupá teplota páry a sytá pára přechází v páru přehřátou.

#### 1.1.4.8 STŘEDNÍ ZDÁNlivá MOLÁRNÍ HMOTNOST

Z pohledu „mikrosvěta“, kdy rozlišujeme jednotlivé molekuly, není možné hovořit o molové hmotnosti směsi. Z pohledu „makrosvěta“, však lze hovořit o střední zdánlivé molové hmotnosti  $M$ , jelikož se směs chová, jakoby skutečně tuto molovou hmotnost měla.

#### 1.1.4.9 MĚRNÁ PLYNOVÁ KONSTANTA

Měrná plynová konstanta  $r$ <sup>7</sup> pro konkrétní plyn se stanoví z univerzální plynové konstanty  $R$  a známé molové hmotnosti plynu  $M$ .

### 1.2 KLIMATICKÉ ZMĚNY PŮSOBÍCÍ NA VENTILAČNÍ TURBÍNY

Při provozu turbíny v průběhu jejího technického života dochází k různým klimatickým jevům a stavům. Každá změna ročního období, kdekoli na světě sebou nese své specifické znaky. Například v ostrovních evropských zemích jako třeba Velká Británie je obecně vyšší četnost dešťových srážek průběhu roku oproti České republice a tak je vzduch více nasycen vodními parami a podobně. To je mimo jiné dáno zeměpisnou polohou. Navíc při pobřeží má vzduch vyšší koncentraci obsahu soli oproti vnitrozemí. Z důvodu tohoto působení je důležitý výběr vhodného materiálu turbíny a její kvalitní povrchová úprava.

Na provoz ventilační turbíny z hlediska vnějšího působení má v tomto smyslu největší vliv rychlost větru  $v_w$ , která přímo ovlivňuje její odsávací výkonnost  $Q_v$ . S ohledem na konstrukci turbíny je navržena konstrukční dovolená rychlost rotace turbíny, ze které

<sup>6</sup> Izobarický děj probíhá za konstantního tlaku  $p$ , tedy za podmínky rovnosti tlaků  $p_1 = p_2$  ve stavových rovnicích na začátku (1) a na konci termomechanického děje (2). Při izobarickém ohřevu se do soustavy přivádí teplo  $Q$  a soustava koná práci  $A$ . [12]

<sup>7</sup> Měrná plynová konstanta  $r = R/M [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ . [12]

vychází její maximální provozní rychlost rotace. Ta je důležitým parametrem při jejím samotném výběru pro daný účel a lokaci. Po překročení této rychlosti v důsledku značného zvýšení rychlosti větru  $v_w$  se regulační klapka turbíny uzavře, čímž se omezí průtok vzduchu potrubím, respektive turbínou. Tak zanikne provozní podtlak pod hlavicí a nedojde k poškození komponentů turbíny.

*Tab. 4 Beaufortova stupnice [36], [38]*

Stupeň	Rychlost větru $v_w$		Slovní označení	Slovní označení
[–]	$[m \cdot s^{-1}]$	$[km \cdot h^{-1}]$	[CS]	[EN]
0	0-0,2	0-1	Bezvětrí	Calm
1	0,3-1,5	1-5	Vánek	Light air
2	1,6-3,3	6-11	Větrík	Light breeze
3	3,4-5,4	12-19	Slabí vítr	Gentle breeze
4	5,5-7,9	20-28	Mírný vítr	Moderate breeze
5	8,0-10,7	29-38	Čerství vítr	Fresh breeze
6	10,8-13,8	39-49	Silný vítr	Strong breeze
7	13,9-17,1	50-61	Mírný víchř	High wind, near gale
8	17,2-20,7	62-74	Čerství víchř	fresh gale
9	20,8-24,4	75-88	Silný víchř	Strong/severe gale
10	24,5-28,4	89-102	Plný víchř	whole gale
11	28,5-32,6	103-117	Vichřice	Violent storm
12	32,7- a více	118 a více	Orkán	Hurricane

Rychlost větru  $v_W$  klasifikuje tzv. Beaufortova stupnice<sup>8</sup>. Slouží k odhadu rychlosti větru podle jeho snadno pozorovatelných projevů na moři či pevnině. Beaufortova stupnice má dvanáct stupňů, kdy každý z nich charakterizuje určitý interval rychlostí větru a tomu odpovídající slovní označení. Jelikož výrobci turbín deklarují pro některé typy únosnost v extrémních případech až kolem  $240 \text{ km/h}$  rychlosti větru  $v_W$ , což klade otázku, zda by uvedené hodnotě rychlosti větru odolala samotná stavba s ohledem na celosvětově různorodou kvalitu a provedení konstrukcí obytných i průmyslových staveb, Tab. 4 by bylo možné dále prodloužit o další stupně<sup>9</sup>.

Podstatným faktorom na provoz je ďalej teplota resp. rozdiel teplot vzduchu  $\Delta t_p$ . Jedná sa o absolútnu hodnotu rozdielu teplot vzduchu v interiéri a exteriéri. Preto sa napríklad v zimných mesiacoch zavírajú regulačné klapky, aby nedochádzalo k veľkým tepelným ztrátam.

### 1.3 VENTILACE

Ventilace je přirozený nebo řízený proces oběhu vzduchu (přívodu a odvodu vzduchu) danou stavbou. Jedná se např. ve výrobní haly, rodinné domy, komerční objekty a další stavby, kde bývá uplatněn ventilační systém, který lze definovat jako koncepční soubor prvků

<sup>8</sup> Beaufortova stupnice byla vytvořena počátkem 19. stolní kontradmirálem britského námořnictva Francisem Beaufortem. Původně nesloužila pouze k odhadu rychlosti větru, ale byla dvanáctibodovou škálou vztahující se k vhodnosti pro plavbu s určitým počtem plachet. [36], [38]

<sup>9</sup> Na Beaufortovu stupnici navazuje Saffirova-Simpsonova hurikánová stupnice. [36], [38]

pro přívod čerstvého vzduchu a odvod škodlivin z větraných prostorů. Tento systém je složen z jednotlivých ventilačních zařízení, které jsou konkrétním provedením ventilačního systému v daném objektu.

Mezi základní způsoby ventilace budov patří nucené větrání, kdy nucený odvod vzduchu zajišťuje např. ventilátor. Dalším způsobem větrání budov je použití pasivního potrubí např. v starších bytových domech, kdy dochází k přirozenému odvodu vzduchu z bytů potrubím až ke střešnímu vyústění. Kombinací přirozeného a nuceného větrání je hybridní způsob větrání. Nejjednodušším způsobem zajištění ventilace budov je ruční otevírání oken pro provětrávání. I během doby, kdy budova není obsazena, by měl být zajištěn minimální průtok větracího vzduchu. Použitím ventilačních turbín se aplikuje přirozený nebo hybridní způsob větrání. Tato kapitola byla zpracována dle podkladů [21], [22], [23], [24].

### 1.3.1 POŽADAVKY NA VENTILAČNÍ SYSTÉMY

Větrací systémy v prostorech pro pobyt osob zajišťují přívod čerstvého venkovního vzduchu a odvod znečištěného vzduchu látkovými škodlivinami, popř. nadměrným teplem. Dalšími kategoriemi prostor z hlediska větrání jsou prostory pobytové, pracovní nevýrobní a pracovní výrobní, přičemž ke všem se vztahují příslušné právní předpisy a technické normy.

**Podle zdroje tlaku zajišťujícího proudění vzduchu se rozlišují systémy:**

- a) nuceného větrání
  - zdroj tlaku je mechanický (ventilátor, ejektor),
- b) přirozeného větrání
  - zdroj tlaku je přirozený (rozdíl hustot vzduchu, dynamický účinek větru),
- c) hybridního větrání
  - kombinace přirozeného a nuceného větrání.

**Při návrhu těchto systémů jsou podstatné:**

- a) návrhové parametry
  - soubor požadovaných parametrů vnitřního prostředí a určujících podmínek okolního prostředí pro návrh větracího nebo klimatizačního systému,
- b) garantované parametry
  - soubor parametrů vnitřního prostředí, které musí být dodrženy v kontrolních bodech vnitřního prostředí v průběhu ročního a denního období, při definovaných parametrech okolního prostředí, chodu technologických zařízení, činnosti osob aj.

**Podle účelu lze rozlišit pro větrání a klimatizaci následující požadavky na úpravu stavu prostředí<sup>10</sup>:**

- 1) hygienické - z hlediska ochrany lidského organismu,
- 2) technologické - pro funkci výrobních/pracovních procesů, strojů, pro uskladnění výrobků,
- 3) biologické - v zemědělství pro ustájení zemědělských zvířat, uskladnění zemědělských produktů,

---

<sup>10</sup> Kvalita vnitřního vzduchu se vyjadřuje koncentrací oxidu uhličitého  $CO_2$  [ppm, % obj.]. [21]



- 4) mikrobiologické - ve zdravotnictví, farmacii,
- 5) bezpečnostní - pro ochranu před výbuchem hořlavých látek,
- 6) požární - ochrana vzduchotechnických zařízení před šířením požáru, větrání chráněných únikových cest, zařízení pro odvod kouře a tepla při požáru.

### Základní hodnoty pro projektování vzduchotechniky budov:

Zdravé prostředí předpokládá pro obyvatele domu vzduch s obsahem  $CO_2$  do 1500 [ppm], což odpovídá hodnotě 0,15 [%] celkového objemu. Při této hodnotě se začíná projevat u člověka únava a popř. ospalost v důsledku této koncentrace. Tato podmínka znamená výměnu  $25 [m^3 \cdot h^{-1}/osoba]$ . Především v zimních měsících tak dodržení této podmínky znamená ohřátí  $25 [m^3 \cdot h^{-1}/osoba]$ , při diferenci teplot  $\Delta t_p$  dle aktuálního počasí, např. z vnější (okolní) teploty  $t_p = -10^\circ C$  na teplotu  $t_p = 23^\circ C$  uvnitř stavby.

Jak již bylo zmíněno v Úvodu obsah  $CO_2$  by neměl obecně překročit 1000 [ppm], tedy 0,1 [%] celkového objemu vzduchu, avšak ještě snesitelná pro člověka představuje hodnota  $CO_2$  8000 [ppm] neboli 0,8 [%] celkového objemu.

Hodnoty koncentrace  $CO_2$  3000 [ppm] neboli 3 [%] celkového objemu a výše jsou již za hranicí snesitelnosti.

**Př.** Osmi-patrová obytná budova s odvodovým ventilačním potrubím (pro sloupec osmi bytů) o průměru  $\varnothing D_p = 2 \times 355 [mm]$ , při rychlosti v potrubí  $c_1 = 1 [m \cdot s^{-1}]$  a hodnotě koncentrace  $CO_2$  0,15 [%] celkového objemu.

Tab. 5 Příklad ventilace budovy

Počet pokojů	1	2	3	[-]
Počet lidí v místnosti	2	3	4	[-]
Požadovaný průtok na počet osob	400	600	800	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
Průtok vzduchu potrubím	713	713	713	$[m^3 \cdot h^{-1}]$



Obr. 3 Schéma množství vzduchu / osoba

### 1.3.2 KVALITA ODPADNÍHO A ODVÁDĚNÉHO VZDUCHU

V obytných prostorech je kvalita vnitřního vzduchu ovlivněna převážně nevýraznými zdroji škodlivin (stavební materiály, vnitřní vybavení a metabolismus osob) a kvalitou venkovního vzduchu.

V normě [22] je uvedena specifikace typů vzduchu, která je používána při návrhu ventilačních systémů a následné tvorbě výkresové dokumentace ventilačních systémů. Její vybrané položky jsou uvedeny v Tab. 6 níže.

Tab. 6 Označení a specifikace vybraných typů vzduchu v technické dokumentaci [22]

Č.	Typ vzduchu	Barva	Definice
1	Venkovní vzduch	zelená	Vzduch vstupující do systému nebo otvorem do objektu bez jakékoliv úpravy
2	Odváděný vzduch	žlutá	Vzduch odváděný z upravovaného prostoru
3	Odpadní vzduch	hnědá	Vzduch vyfukovaný do atmosféry

Odpadní vzduch musí být vyfukován do atmosféry tak, aby neobtěžoval a neohrožoval okolí, přičemž se doporučuje vyfukovat vzduch svisle nad střechu budovy. Výfukové otvory odpadního vzduchu s vyšším obsahem vodních par (vzduch z kuchyní, bazénů aj.) musí být řešeny tak, aby kondenzované páry nenarušily stavbu a její okolí.

V Tab. 7 je uvedena klasifikace tříd odváděného vzduchu dle [21]. V praxi se často větrání řídí podle koncentrace<sup>11</sup>  $CO_2$  ve větraném prostoru.

Tab. 7 Klasifikace tříd odváděného vzduchu (ETA) a odpadního vzduchu (EHA) [22]

Třída	Charakteristika	Příklady
ETA 1 EHA1	Odváděný vzduch s nízkým znečištěním	
	Vzduch odvedený z místností, kde hlavním zdrojem emisí jsou stavební konstrukční materiály a z pobytových místností, kde hlavními zdroji emisí je lidský metabolismus a konstrukce budovy. Kuřácké místnosti jsou vyloučeny.	Kanceláře včetně integrovaných malých skladů, prostory veřejných služeb, učebny, schodiště, chodby, jednací místnosti. Komerční prostory bez dalších zdrojů znečištění.
ETA2 EHA2	Odváděný vzduch se střední mírou znečištění	
	Vzduch z pobytových místností se stejnými zdroji znečištění jako třída 1, ale s vyšším obsahem znečištění. Tyto místnosti by jinak spadaly do ETA 1, ale je zde dovoleno kouření.	Jídelny, kuchyně pro přípravu horkých nápojů, sklady, skladové prostory v kancelářských budovách, hotelové místnosti, šatny.
ETA3	Odváděný vzduch s vysokou mírou znečištění	

<sup>11</sup> Koncentrace je udávána v „ppm“, což vyjadřuje jednu miliontinu celku (z angličtiny „parts per million“). [40]

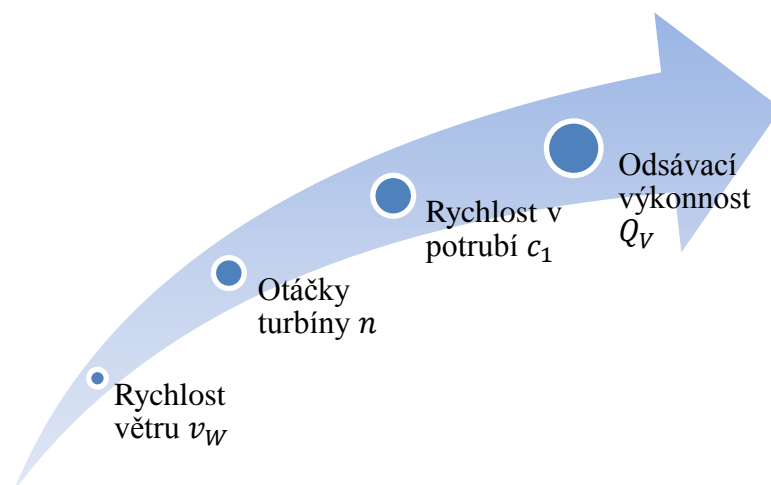
Třída	Charakteristika	Příklady
EHA3	Vzduch z místnosti, kde dochází k uvolňování vlhkosti, chemikálií atd., které výrazně snižují kvalitu vzduchu.	Toalety a umývány, sauny, kuchyně, kopírky a kuřácké místnosti.
ETA4 EHA 4	Odváděný vzduch s velmi vysokou mírou znečištění	
	Vzduch, který obsahuje zápachy a nečistoty s účinky na zdraví v koncentracích převyšující limitní hodnoty pro bytové místnosti.	Odsávání zákryty pro profesionální užití, místní odsávání v kuchyních, odsávání garáží, tunelu, parkovišť, místností, kde dochází k manipulaci s barvivy a rozpouštědly, skladu spínavého prádla, místností pro zbytky jídel, místností pro centrální vysavače, vytižené kuřácké místnosti

## 1.4 FUNKCE VENTILAČNÍ TURBÍNY

Hlavice ventilační turbíny bývá zpravidla instalována spolu se stavitelným kloubem a základnou na střechy objektů, z jejichž interiéru chceme zajistit pravidelné odsávání znečištěného vzduchu. Odvod vzduchu z interiéru probíhá pomocí ventilačního potrubí, se kterým je spojena hlavice turbíny. Ta je poháněna prouděním vzduchu (povětrím) a svou rotací vytváří plynulý odtah a její odsávací výkonnost  $Q_V$  je dána rychlostí proudění větru  $v_W$ . Pod hlavicí se vytváří podtlak, což zajišťuje pravidelné odsávání vzduchu z interiéru objektu. Kombinací ventilační turbíny a axiálního ventilátoru v potrubí lze zvýšit tah turbíny. Aby byla zajištěna efektivní ventilace objektu, musí být průtok přivedeného venkovního vzduchu přírodními otvory a netěsnostmi menší než průtok (odsávací výkonnost) odváděného odpadního vzduchu turbínou.

Turbína dále například zajišťuje snižování teploty v půdních prostorech v letním období, a tím snižuje teplotní zatížení celého objektu. Trvale též zajišťuje vzdušný oplach střešního pláště, ze kterého v létě odvádí horký přehřátý vzduch a v zimním období vlhkost. A tím současně prodlužuje životnost střechy.

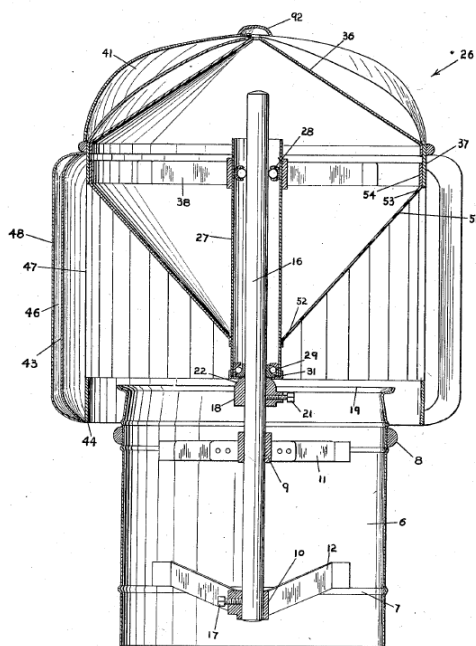
Umístěním turbíny do vodorovné polohy, v co největší výšce, popřípadě umístěním na návětrné straně se dosáhne nejvyšší účinnosti při působení rychlosti větru  $v_W$ . Účinnost ventilace zvyšuje i rozdíl teploty  $\Delta t_p$  mezi vnitřním a vnějším prostředím, který v létě může být zvláště v podstřešních interiérech značný. [28], [32], [35], [37]



## 1.5 HISTORIE VENTILAČNÍCH TURBÍN

Historie ventilačních turbín začíná v USA v Los Angeles, kde byla 30. října roku 1929 patentována první ventilační turbína označením v originálu „Rotary ventilator“. Autorem tohoto patentu byl Američan *Vaughn H. Meadows*. Tato turbína je zobrazena na Obr. 5 níže.

České ventilační turbíny a větrací ventilátory navázaly na 30. léta 20. století, kdy se v Československé republice ventilační turbíny používaly se stejnou funkcí pod názvem „rotační hlavice“. Ventilační rotační hlavice poháněné silou větru mají v naší republice více než osmdesátiletou výrobní tradici. V současné době jsou díky své velké oblibě na českém trhu dostupné konstrukce turbín jak zahraniční tak i tuzemské produkce v mnoha různých variantách a provedeních. [26], [32], [35]



Obr. 5 První ventilační turbína-autor Vaughn H. Meadows [29]



Obr. 4 Moderní konstrukce ventilační turbíny [32]

## 1.6 KONSTRUKCE VENTILAČNÍCH TURBÍN

V dnešní době jak již bylo zmíněno, je na trhu široký sortiment ventilačních turbín od různých světových výrobců, které se navzájem odlišují jak svou konstrukcí, použitým materiálem na jednotlivé prvky kompletu, tak použitým „know-how“. Avšak společným rysem všech, který sdílají je jejich poměrná konstrukční jednoduchost. Jako materiál konstrukce se používá nejčastěji hliník<sup>12</sup> a jeho slitiny. Obecně slitiny hliníku patří kromě ocelí k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům. K přednostem slitin hliníku lze počítat zejména nízkou měrnou hmotnost  $\rho_{Al}$  a poměrně dobrou pevnost, což znamená, že měrné pevnostní charakteristiky např.  $(R_{mAl}/\rho_{Al})$  některých slitin hliníku jsou srovnatelné s obdobnými charakteristikami ocelí, případně jsou lepší. Slitiny hliníku pokud neobsahují měď, velmi dobře odolávají korozi v atmosféře a látkám kyselé povahy. Nedostatkem slitin hliníku je jejich nízká tvrdost a tedy snadné zhmždění povrchu zpracovávaného materiálu a výrobků, obtížné třískové obrábění. Pevnost hliníku v tahu je nízká, ve stavu měkkém bývá

<sup>12</sup> Surovinou pro výrobu hliníku je minerál bauxit, v čistém stavu oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ ). V roce 1906 byla vyvinuta první slitina hliníku, známá jako dural ( $AlCu4Mg$ ). [14]

$R_{mAl}$  kolem 70 MPa, ve stavu tvrdém (po tváření za studena)  $R_{mAl}$  kolem 130 MPa. Tvářením za studena se uskutečňuje trvalá změna tvaru materiálu bez úběru třísek působením vnější síly. Podle převládajícího průběhu deformace je tváření plošné a objemové, které je blíže popsáno v literatuře [5].

Nejčastější tepelné zpracování hliníku je rekrytalizační žhání. Hlavními operacemi tepelného zpracování součástí ze slitin hliníku jsou žhání a vytvrzování, které jsou blíže popsány v literatuře [14].

Mezi způsoby zpracování materiálu obecně tvářením za studena patří: lisování, stříhání, ohýbání, tažení, protlačování, válcování a další. [5]

Dalšími používanými materiály pro konstrukce turbín jsou pozinkovaná ocel nebo plast (vysokojakostní polymer) odolný vůči UV záření.

### Hlavní součásti ventilačních turbín:

Následující podkapitoly jsou zaměřeny podrobněji na jednotlivé dílce sestavy ventilační turbíny, jako jsou rotační hlavice, ložiska a další. [28], [32], [35], [37]



Obr. 6 Řez ventilační turbínou [32]

#### Rotační hlavice

- 1

#### Tvarované lopatky

- 2

#### Ložiska

- 3

#### Nosná konstrukce

- 4

#### Stavitelný kloub

- 5

#### Základna

- 6

### 1) Rotační hlavice

Rotační hlavice je hlavním pracovním prvkem celé turbíny. Konstrukce je složena ze zpevněných tvarovaných lopatek a z několika, obvykle dvou speciálních ložisek. Hlavice vytváří podtlak, trvale odsává vzduch z prostoru pod ní.

Materiálem hlavice je nejčastěji hliník (Al) a jeho slitiny, i když někteří výrobci produkují tyto hlavice z vysokojakostních polymerů s UV filtrem, který zpomaluje degradaci materiálu při působení slunečního záření a klimatických změn v průběhu jeho životního cyklu.

Konstrukce rotační hlavice je uzpůsobena tak, aby odolávala rychlosti větru  $v_w$  v některých případech až o hodnotě 240 Km/h. Spojení rotační hlavice mohou být jištěny

např. šroubovým spojením s metrickým závitem a tím je zajištěna bezpečnost proti vytržení při nárazových větrech. Velikost hlavice se určuje průměrem sacího hrdla  $\varnothing D_H$  (v závislosti na  $\varnothing D_p$ ) většinou v milimetrech.

Naproti dnešním rotačním hlavicím byly dříve často používané hlavice bez pohyblivých částí tzv. *CAGI* hlavice.

## 2) Tvarované lopatky

Zajišťují dokonalý výkon a to díky speciálně vyvinutému aerodynamickému tvaru. Lopatky vytváří co možná nejúčinnější opěrnou plochu pro přichozí vítr a umožňují získat velký krouticí moment. Odpor lopatek tak zajistí přenos síly větru na rotační část turbíny. Jednotlivé lopatky jsou vhodně nasměrované tak, aby vyvinuly při rotaci hlavice maximální podtlak. Lopatky navíc obsahují po svém obvodu drážky (prolisy), které zvětší opěrné plochy a současně umožní plynulé odvádění vody mimo turbínu. Jednotlivé lopatky se po získání aerodynamického tvaru spojí na dvou místech s tělem samotné hlavice šrouby či nýty. Horní konec lopatky se uchycuje na kruhový vrchlík hlavice. Spodní konec pak na otočný kruhový lem (obruč) rotační hlavice. Nejčastěji používaným materiálem je obdobně jako u těla hlavice hliník.

## 3) Ložiska

Hřídel ventilační turbíny je uložen nejčastěji ve dvou ložiscích. Aby turbína zajistila nejvyšší výkon, je nutné, aby obě ložiska umožnila volnou rotaci hlavice na hřídeli a to bez citelného odporu. Ložisko je nejcennějším prvkem celé turbíny. Je použité teflonové pouzdro, aby dokonale odolávalo vysokým rozdílům teplot, které se v létě a v zimě vyskytují. Ložiska jsou zcela uzavřena (mazána plastickým mazivem) a díky tomu není potřeba žádná údržba po celou dobu jejich technického života. Ložiska jsou současně teflonovým pouzdem odhlučněna.

## 4) Nosná konstrukce

Nosná konstrukce je složena z několika profilovaných ramen, které musí zajistit vysokou odolnost konstrukce vůči proměnlivému nárazovému větru. Jako materiál konstrukce se používá nejčastěji hliník a jeho slitiny, hlavně kvůli své odolnosti vůči okolnímu prostředí (klimatickým změnám počasí, korozi). Dalšími používanými materiály pro konstrukce jsou ocel nebo plast, přičemž je důležité, kvůli vysokému zatížení při silném větru, aby byla nosná konstrukce z materiálového hlediska homogenní.

## 5) Stavitelný kloub

Stavitelný kloub (koleno), který je obvykle doplňkovou součástí nosné konstrukce dovoluje úhlové natočení v rozsahu  $0 - 45^\circ$  a tím umožňuje montáž i na šikmé střechy, protože úhlové natočení kloubu zajistí, že rotační hlavice bude umístěna v horizontální poloze bez ohledu na tvar střechy, pokud konstrukci střechy v místě umístění ventilační turbíny vyhovuje zmíněný úhel natočení kloubu.

## 6) Základna

K uchycení do střešního pláště slouží typizované základny, určené pro všechny běžné krytiny střech. Základna je vždy tvarována tak, aby maximálně usnadnila montáž a současně zajistila dokonalé napojení na střešní krytinu. Výrobci obvykle základnu nabízí v pozinkovaném provedení.



## 1.7 PŘEHLED VÝROBCŮ VENTILAČNÍCH TURBÍN

Následující kapitola obsahuje přehled vybraných světových výrobců ventilačních turbín a jejich produktů. Tyto produkty lze vzájemně porovnat dle požadovaných vlastností a zajistit tak optimální výběr řešení pro konkrétní aplikaci.

### 1.7.1 LOMANCO

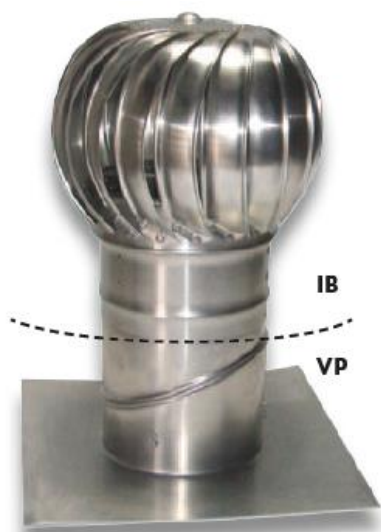
- webová adresa: <http://www.lomanco.com/>
- zeměpisná lokace: USA (Jacksonville, Arkansas)



Obr. 7 Logo firmy Lomanco [32]

Historie firmy sahá až do 50. let 20. století, kdy se ventilační turbíny firmy *Lomanco* staly především na území USA hlavně díky své spolehlivosti žádaným produktem. Později se rozšířili do celého světa. Hlavními přednostmi, kterými se firma vymezuje vůči své konkurenci, jsou například vlastní patentovaná kuličková ložiska *Lomanco*, které dlouhodobě experimentálním zkoušením dosahují vysokých hodnot trvanlivosti. Ložiska jsou samomazací a jsou zcela uzavřena, pro zabránění vniku nečistot. Je použito teflonové pouzdro, které odolává vysokým diferencím teplot  $\Delta t_p$ , které se v létě a v zimě vyskytují. Ložiska uložená v teflonovém pouzdře zajistí bezhlučný provoz a tlumí nárazy. [32]

#### 1.7.1.1 TYP IB 8



**IB8 + VP8**

Obr. 8 Lomanco IB8+VP8 komplet [32]

Tab. 8 Provedení turbíny Lomanco IB 8, VP8 [32]

Provedení		Průměr hrdla $\varnothing D_H$
		203 [mm]
Hliníkové	Samostatná hlavice	IB 8
	Hlavice, krk 0 – 45°, základna	-
	Krk 0 – 27°, základna	VP 8
Pozinkované	Hlavice, krk 0 – 27°, základna	-

Tento typ turbíny je vhodný pro použití v objektech, jako jsou rodinné domy. Zejména pro odvětrávání půdních prostorů, koupelen, WC a sklepních prostorů.

Oproti ostatním turbínám firmy *Lomanco* se jedná o rozměrově nejmenší (průměr hrdla  $\varnothing D_H$  činí 203 mm) a nejméně výkonnou turbínu z produkce firmy. IB 8 označuje samostatnou ventilační hlavici. Stavitelný krk a základna pro IB 8 má označení VP 8. Číslo za označením VP udává průměr hrdla  $\varnothing D_H$  v palcích. Tato turbína je dostupná pouze v hliníkovém provedení viz Tab. 8.

### 1.7.1.2 TYP BIB 12 A BIB 14

Oba typy představují řešení odvětrávání například šachet panelových domů, průmyslových hal, sklepních, komerčních prostorů, administrativních budov nebo skladovacích prostorů. Oproti turbíně *IB 8* dosahují vyšší odsávací výkonnosti  $Q_V$ .

Turbína *BIB 14*, jakožto nejvýkonnější typ, je vhodná pro odvětrávání bytových domů, kde je vysoký požadavek na odvod odpadního vzduchu. Pro zvýšenou potřebu nárazového odvětrávání lze k turbíně nainstalovat pomocný elektrický ventilátor. Tyto turbíny jsou certifikovány až do rychlosti větru  $195 \text{ km/h}$ . Turbína typu *BEB 14* je modifikací typu *BIB 14*, se zpevněnou konstrukcí. Výrobce uvádí odolnost vůči rychlosti větru až  $240 \text{ km/h}$ .

Označení *TIB* znamená samostatnou hlavici, zatímco *BIB* označuje sestavu turbíny, krku a základny. Číselná hodnota za označením *TIB*, *BIB* udává průměr hrdla turbíny  $\varnothing D_H$  v palcích. Materiálem turbíny je u obou typů hliníková slitina, což zajišťuje odolnost proti působení klimatických vlivů na turbínu. Tabulka uvedená níže nabízí přehled provedení obou typů.

Tab. 9 Provedení turbíny Lomanco *BIB 12* a *BIB 14* [32]

Provedení		Průměr hrdla $\varnothing D_H$		
		305 [mm]		356 [mm]
Hliníkové	Samostatná hlavice	TIB 12	-	TIB 14
	Hlavice, krk 0 – 45°, základna	BIB 12	-	BIB 14
	Krk 0 – 27°, základna	-	-	-
Pozinkované	Hlavice, krk 0 – 27°, základna	-	GT 12	-

### 1.7.1.3 TYP GT 12

Tento typ představuje levnější variantu typu *BIB 12*, která je vhodná zejména pro odvětrávání menších komerčních, průmyslových, popřípadě bytových objektů a garáží. Turbína je dostupná pouze v pozinkovaném provedení a to jako pouze sestava hlavice, krk a základna, samostatně ji výrobce nenabízí. Na Obr. 10 je tato turbína zobrazena.



Obr. 10 Typ Lomanco GT 12 [32]

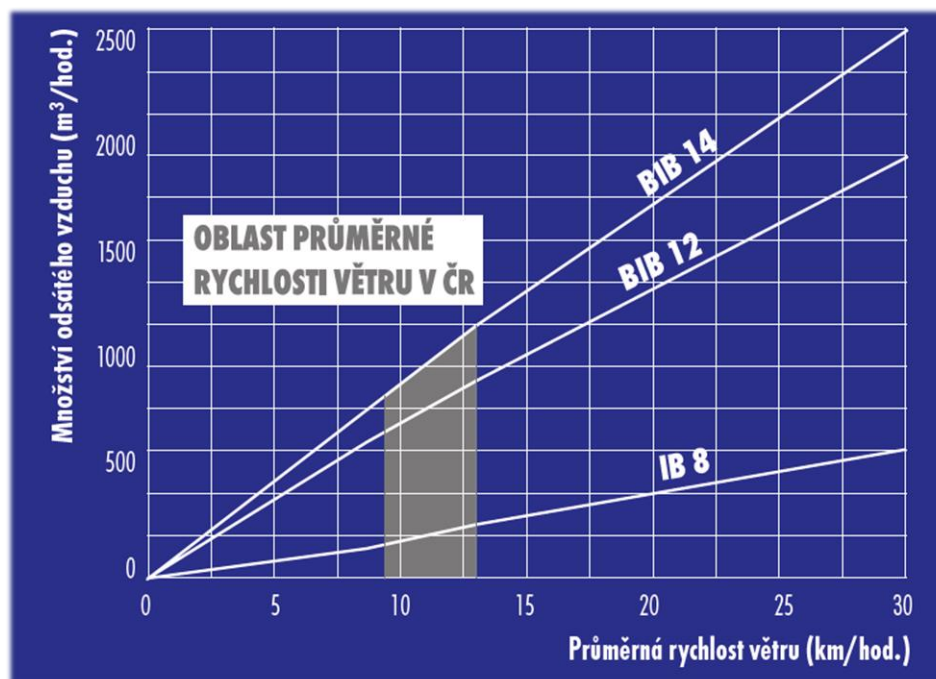


Obr. 9 Aplikace typu Lomanco *BIB 14* [32]



#### 1.7.1.4 SROVNÁNÍ TURBÍN LOMANCO

Firma *Lomanco* vyrábí výše zmíněné typy, které jsou dostupné jednak samostatně, ale také i jako sestavy. Jednotlivé typy jsou dostupné v různých barevných provedeních. Tabulka uvedená níže na Obr. 12 představuje porovnání jednotlivých typů dle jejich odtahové výkonnosti  $Q_V$  v závislosti na rychlosti větru  $v_W$ . [32]



Obr. 11 Zobrazení výkonnosti turbín Lomanco [32]

Typ/rychlost větru	8 km/hod	13 km/hod	24 km/hod
BIB 12	590 m³/hod	930 m³/hod	1 750 m³/hod
BIB 14	710 m³/hod	1 200 m³/hod	2 250 m³/hod
GT 12	590 m³/hod	930 m³/hod	1 750 m³/hod
IB 8	165 m³/hod	295 m³/hod	565 m³/hod
TIB 12	590 m³/hod	930 m³/hod	1 750 m³/hod
TIB 14	710 m³/hod	1 200 m³/hod	2 250 m³/hod

Obr. 12 Odsávací výkonnost turbín Lomanco [32]

### 1.7.2 EDMONDS

- webová adresa: <http://www.edmons.com.au/>
- zeměpisná lokace: Austrálie ( Sydney's Crows West)



Obr. 13 Logo firmy Edmonds [28]

Firma byla založena v Austrálii v roce 1934 Nevillem Edmondsem, který si nechal v témže roce patentovat turbínu cibulového tvaru. Produkty firmy *Edmonds* byly exportovány téměř do 70 zemí po celém světě. Původně se jednalo o turbíny určené k odvětrávání obytných objektů.

Téměř po čtyřiceti letech byla firma odprodána a nyní je součástí koncernu CSR. V současné době do produkce firmy patří turbíny určené jak pro k odvětrávání obytných objektů, tak turbíny určené k průmyslovému použití, přičemž hlavními trhy společnosti jsou Asie, Austrálie a Evropa.

Společnost nabízí širokou škálu různých typů a provedení rezidenčních, průmyslových a hybridních ventilačních turbín, které jsou výsledkem neustálého vývoje. Pro ně má různá barevná řešení podle barvy střešní krytiny. Nabízí také doplňky pro odvětrávání, jako jsou například regulační prvky nebo potrubí.

Oproti konkurenci firma u svých turbín deklaruje použití unikátního systému odpružení, kdy spodní část lamel je nýtována na plastovém rámu z pružného materiálu ABS, což zabraňuje deformaci turbíny bočním větrem. Tím se dále zabrání k nepravidelnému chodu turbíny, jejímž následkem může být nepříjemné pískání při její rotaci. [28]

#### 1.7.2.1 TYP SUPAVENT 250, TURBOVENTURA 150, SEWERVENT 150, WINDMASTER 300

Všechny níže zmíněné typy výrobce řadí do kategorie - rezidenční turbíny, které jsou především určené pro obytné objekty. Číselná hodnota za jejich obchodním označením udává průměr hrdla turbíny  $\varnothing D_H$  v milimetrech.

Turbína *SUPAVENT 250* dosahuje vysoké odsávací výkonnosti  $Q_V$  i při slabém větru a svým designem je vhodná zejména pro rodinné a bytové domy. Je vyrobena s vysoce odolného plastu s UV stabilizací. Díky použitým materiálům vykazuje nízkou hmotnost. Turbína dostupná také v hybridním provedení.

Turbína *TURBOVENTURA 150* je nejmenší ventilační turbínou na trhu. Je vhodná zejména pro odvětrávání částí rodinných nebo bytových domů jako jsou koupelny, WC nebo garáže. Je vyrobena s vysoce odolného plastu s UV stabilizací.

Turbína *SEWERVENT 150* je primárně určena k větrání kanalizačních výpustí. Součástí turbíny jsou nerezová ložiska zajišťující bezproblémový chod v extrémně trvalém vlhkém prostředí. Tato turbína je dodávána pouze v světlešedém provedení z důvodů vysoké koncentrace škodlivých výparů v kanalizačním potrubí, které trvale poškozuje probarvený plast. Vhodná pro odvětrávání kanalizačních potrubí, koupelen a WC.

Turbína *WINDMASTER 300* byla poprvé vyrobena již v roce 1934 a od té doby prošla řadou inovačních změn. Její současná podoba je zobrazena níže. Lamely turbíny, které jsou zhotoveny z „námořního“<sup>13</sup> hliníku, mají vysokou odolnost proti deformaci. Rám je z pružného plastu ABS, který zabraňuje deformaci turbíny při bočních nárazech větru. Vhodná turbína pro odvětrávání ventilačních šachet, garáží nebo skladů.

<sup>13</sup> Hliník a slitiny hliníku - specifikace pro tvářené a lité výrobky pro námořní použití uvádí norma ČSN EN 13195.



Obr. 15 Edmonds typ TURBOVENTURA 150 [28]



Obr. 14 Edmonds typ SUPAVENT 250 [28]



Obr. 17 Edmonds typ WINDMASTER 300 [28]



Obr. 16 Edmonds typ SUWERVENT 150 [28]

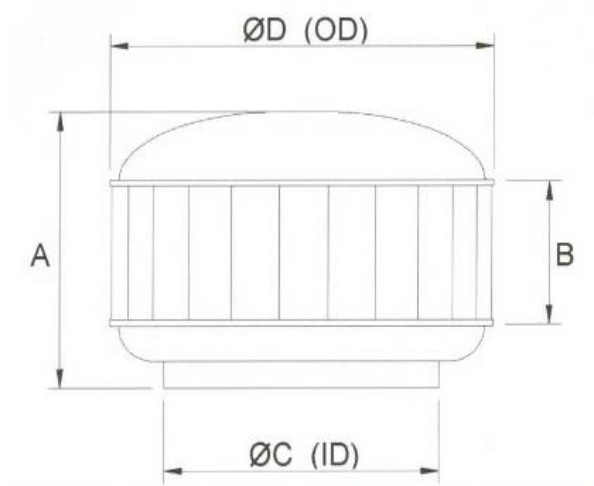
### 1.7.2.2 TYP HURRICANE

Koncern CSR byl prvním výrobcem průmyslových ventilačních turbín již v 80. letech minulého století. Právě tehdy vznikl typ *HURRICANE*, který patří do této kategorie.

Turbína *HURRICANE* je zkonstruována jako radiální oběžné kolo s dozadu zahnutými lopatkami ( $\beta_2 < 90^\circ$ ). Je všeobecně známo, že konstrukce turbíny cibulového tvaru není vhodná pro průměry hrdla  $\varnothing D_H$  většího než  $400\text{ mm}$ , protože jsou náchylné k deformaci bočním větrem. Proto se vyrábí většinou pouze do průměru hrdla  $350\text{ mm}$ , pro mnoho výrobců je to maximální vyráběný průměr. Tvar ovlivňuje také velikost podtlaku. Výrobce nabízí tento typ turbín v rozměru  $\varnothing D_H$  od  $100\text{ mm}$  do  $900\text{ mm}$ .

Odsávací výkonnost  $Q_V$  je až třikrát větší oproti turbínám cibulového tvaru. Hlavními faktory ovlivňující odsávací výkonnost kromě rychlosti větru  $v_w$  také komínový efekt. Proto jsou turbíny vhodné pro průmyslové haly a sklady s výškou nad 5 metrů. Čím je výška větraného objektu vyšší, tím více komínový efekt urychluje pohyb vzdušiny.

Tyto turbíny díky větší ploše lopatek vykazují vyšší dotáčivost i při nízké rychlosti větru oproti turbínám cibulového tvaru. Je vyrobena ze speciálního tzv. „námořního hliníku“, aby odolala náročným klimatickým podmínkám. Je atestována na rychlost větru  $240\text{ km/h}$  s odolností proti dešti (zatékání).



Obr. 19 Edmonds typ HURRICANE schéma-  
základní rozměry [28]



Obr. 18 Edmonds typ HURRICANE [28]

Tab. 10 Porovnání odsávací výkonnosti Edmonds typ HURRICANE [28]

Průměr hrdla turbíny	Odsávací výkonnost turbíny $Q_V$ [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]		
	Rychlost větru $v_W$		
$\varnothing D_H$	6 [ $km \cdot h^{-1}$ ]	12 [ $km \cdot h^{-1}$ ]	16 [ $km \cdot h^{-1}$ ]
[mm]	1,7 [ $m \cdot s^{-1}$ ]	3,3 [ $m \cdot s^{-1}$ ]	4,4 [ $m \cdot s^{-1}$ ]
H 100	50,4	118,8	151,2
H 150	396	781,2	997,2
H 300	972	1728	2232
H 400	1332	2268	2880
H 450	1728	2844	3564
H 500	1944	3240	4464
H 600	2232	3974,4	5112
H 700	3398,4	5868	7524
H 800	4438,8	7671,6	9828
H 900	5616	9720	12456

Společnost *Edmonds* vyrábí turbíny *HURRICANE* také v titanovém provedení pro zvláště obtížné podmínky (excelentní chemická odolnost) a turbíny s hybridním pohonem *ECOBASIC* a *ECOPOWER*. Pro řízenou negarantovanou ventilaci se hrdlo turbíny doplňuje o manuální nebo elektrické klapky, kterými se reguluje chod turbíny a odsávací výkonnost  $Q_V$ .

Používají se k ventilaci v objektech, kde je dostačující negarantovaná odsávací výkonnost  $Q_V$ , zejména ke snižování teplotní zátěže a negarantované větrání velkých objektů průmyslových, sportovních, skladovacích, zemědělských, svařoven, větracích šachet.

### 1.7.2.3 SROVNÁNÍ REZIDENČNÍCH TURBÍN EDMONDS

V podkapitole 1.7.2.1 byly uvedeny jednotlivé typy rezidenčních ventilačních turbín, jejichž charakteristiky jsou uvedeny v tabulkách níže.

Tab. 12 Edmonds SUPAVENT 250 [28]

SUPAVENT 250	
Rychlost větru $v_W$	Odsávací výkonnost turbíny $Q_V$
$[m \cdot s^{-1}]$	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
3,4	95,9
5,4	231,0
7,0	314,4
8,2	351,2
9,1	414,9
10,1	452,7

Tab. 11 Edmonds TURBO VENTURA 150 [28]

TURBO VENTURA 150	
Rychlost větru $v_W$	Odsávací výkonnost turbíny $Q_V$
$[m \cdot s^{-1}]$	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
3,3	50,3
5,2	93,8
6,8	142,0
8,2	181,8
9,0	204,1
10,1	248,0

Tab. 14 Edmonds WINDMASTER 300 [28]

WINDMASTER 300	
Rychlost větru $v_W$	Odsávací výkonnost turbíny $Q_V$
$[m \cdot s^{-1}]$	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
2,1	142,9
3,7	237,0
6,3	556,3
8,1	713,6
8,9	792,6
10,1	865,4

Tab. 13 Edmonds SEWER VENT 150 [28]

SEWER VENT 150	
Rychlost větru $v_W$	Odsávací výkonnost turbíny $Q_V$
$[m \cdot s^{-1}]$	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
3,3	50,3
5,2	93,8
6,8	142,0
8,2	181,8
9,0	204,1
10,1	248,0

Výrobce uvádí tabulky s hodnotami odsávací výkonosti  $Q_V$  pro jednotlivé typy rezidenčních turbín při konkrétních rychlostech větru  $v_W$ . Grafická reprezentace dat je zobrazena v Graf. 1 formou bodů, kterými jsou proloženy exponenciály. Pro zajištění alespoň minimálního odtahu odpadního vzduchu je nutné, aby hodnota rychlosti větru byla  $v_W \geq 1 [m/s]$ .

Z Graf. 1 je patrné, že nejvyššího sacího výkonu dosahuje turbína WINDMASTER 300 při rychlosti proudění větru  $v_W \approx 10 [m/s]$ , který s rychlostí větru dále roste. Následuje ji turbína SUPAVENT 250. Stále se však u všech těchto typů jedná o negarantovanou ventilaci, závislou výhradně na rychlosti větru  $v_W$ , pokud nejsou turbíny



vybaveny přídatnými ventilátory. Pokud jsou jimi vybaveny, lze je potom označit za hybridní turbíny.

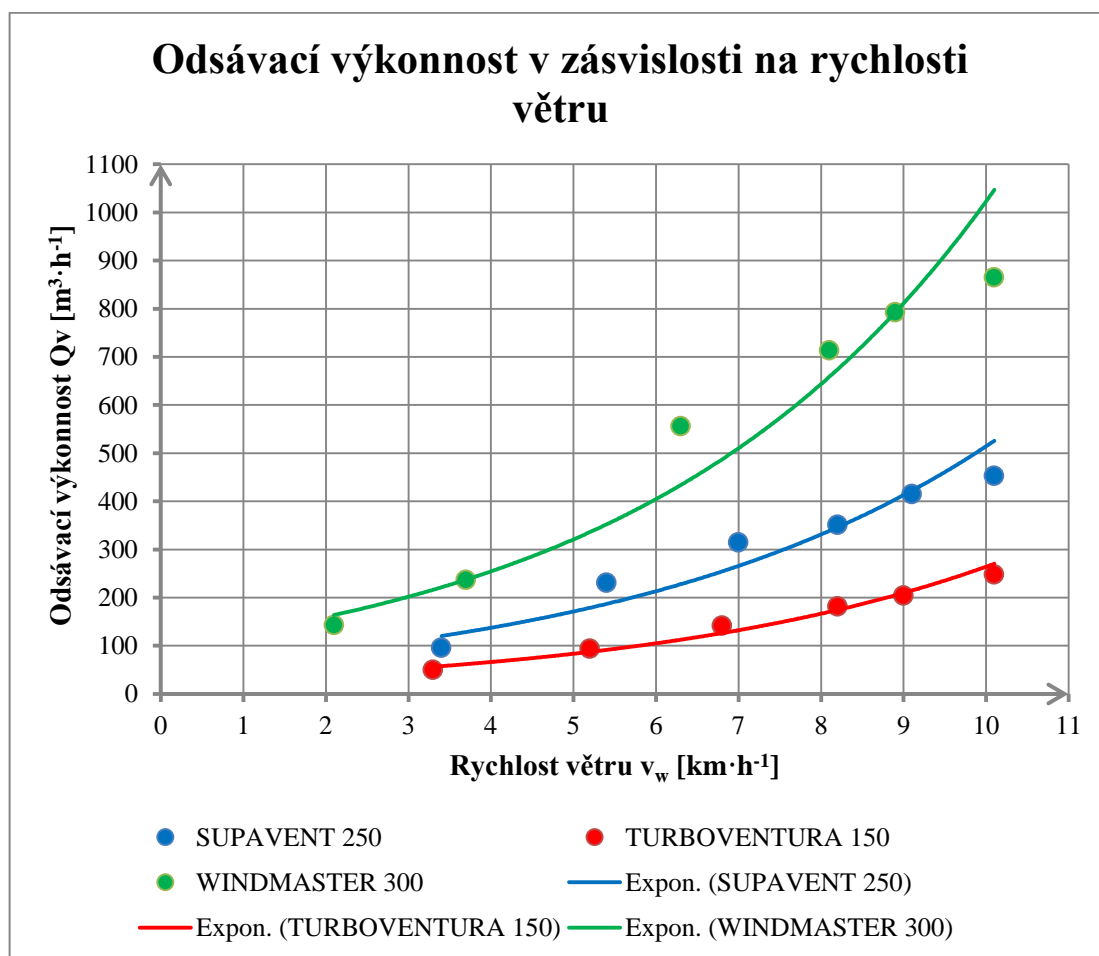
Turbíny *WINDMASTER 300*, *SUPAVENT 250* a *TURBO VENTURA 150* jsou dodávány jako komplet obsahující hlavici, stavitelné hrdlo a základnu i jako samostatná hlavice. Turbína *SEWER VENT 150* je dostupná pouze jako samostatná hlavice.



Obr. 21 Aplikace typ WINDMASTER 300 [28]



Obr. 20 Aplikace typ SUPAVENT 250 [28]



Graf. 1 Odsávací výkonnost v závislosti na rychlosti větru

### 1.7.3 VYTOZ-EKO

- webová adresa: <http://www.vytozeko.cz/>
- zeměpisná lokace: Česká Republika (Kobylnice)



Obr. 22 Logo firmy VYTOZ-EKO [37]

VYTOZ-EKO je česká firma zabývající se výrobou ventilačních turbín, která působí od roku 2009 na tuzemském trhu. Hlavním nabízeným produktem firmy je řada ventilačních turbín pod obchodním označením ZLT. [37]

#### 1.7.3.1 Typ ZLT

Jejich úkolem obdobně jako u ostatních turbín je především průběžné provětrávání interiérů, výrobních, sportovních, skladovacích prostorů, ale také i odvětrávání šachet celých bytových domů. Dále turbíny zajišťují trvalý vzdušný oplach střešního pláště, z kterého v létě odvádí horký přehřátý vzduch a v zimním období vlhkost. Řada turbín ZLT je dostupná v průměrech hrdla  $\varnothing D_H$ , které jsou uvedeny v Tab. 15 níže. V tabulce jsou dále uvedeny hodnoty odsávací výkonnosti  $Q_V$  při konkrétní rychlosti větru  $v_W$ .



Obr. 23 Aplikace ventilační turbíny ZLT [37]



Obr. 24 Ventilační turbína ZLT [37]

Tab. 15 Porovnání odsávací výkonnosti VYTOZ-EKO typ ZLT [37]

Typ	Průměr hrdla turbíny	Odsávací výkonnost turbíny $Q_V$ [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]		
		Rychlost větru $v_W$		
	$\varnothing D_H$	8 [ $km \cdot h^{-1}$ ]	14 [ $km \cdot h^{-1}$ ]	36 [ $km \cdot h^{-1}$ ]
	[mm]	2 [ $m \cdot s^{-1}$ ]	4 [ $m \cdot s^{-1}$ ]	10 [ $m \cdot s^{-1}$ ]
VIV 12/300	300	63	175	740
VIV 14/355	355	180	400	1150
VIV 16/400	400	112	407	1485
VIV 20/500	500	230	698	2380

Turbína ZLT se skládá ze tří základních částí: rotační hlavice, stavitelného kloubu (hrdla) a základny, kdy výrobce nabízí turbínu buď jako komplet (hlavice, kloub, základna) nebo jako samostatnou hlavici.

Označením typu *VIV* v Tab. 15 se rozumí celý komplet. Turbíny *ZLT* mohou být opatřeny regulací pro zajištění optimálního odvětrávání. Regulačním prvkem je mechanická nebo elektromechanická klapka. Pro případ bezvětří nebo nízké rychlosti větru lze k turbíně nainstalovat pomocný elektrický ventilátor, který turbíně zajišťuje trvalý odtah.

Povrchovou úpravou turbíny je nástřik práškovým plastem tzv. komaxitem, který zajišťuje vysokou odolnost vůči klimatickým vlivům a tím i dlouhou životnost.

#### 1.7.4 H-TECH GROUP

- webová adresa: <http://www.vetrani.com/>
- zeměpisná lokace: Česká Republika (Třinec)



Obr. 25 Logo firmy H-tech group [31]

*H-tech group* je česká firma, která se již od roku 1998 zabývá vývojem a výrobou ventilačních turbín. Mimo jiné díky investicím do vlastního vývoje turbín a realizací vlastních patentů vykazují produkty společnosti vysokou kvalitu a životnost.

Konkrétně se jedná o produkty, jako jsou ventilační turbíny, hybridní ventilátory, komínové ventilátory a speciální ventilátory. Komínové ventilátory nebudou v této kapitole dále probírány. Obchodní zastoupení v tuzemsku zajišťuje firma *RAUL-větrací systémy s.r.o.* [31]

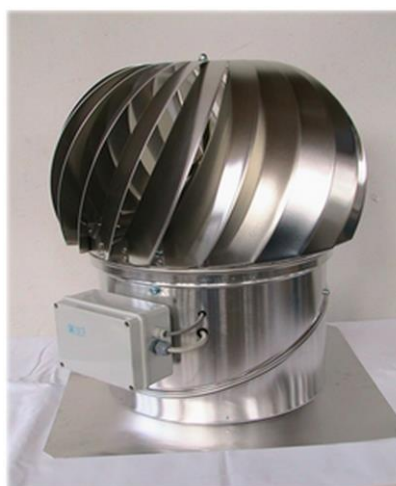
##### 1.7.4.1 VENTILAČNÍ TURBÍNY-TYP VV

Ventilační turbíny firmy *H-tech group* nesou obchodní jméno *větrací ventilátory*. Skládají se ze základny a hlavice. Základna je stavitelná a umožňuje jednoduchou montáž na střechu o sklonu  $0^\circ - 45^\circ$ . Průměry sacího hrdla  $\varnothing D_H$  pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v Tab. 16 níže. Číselná hodnota za označením „VV“ udává průměr sacího hrdla turbíny  $\varnothing D_H$  v milimetrech.

Tyto turbíny jsou dostupné v několika materiálových provedeních a to v nerez, hliníku, mědi, případně z galvanicky zinkované oceli. Jsou vhodné zejména k odvětrávání výrobních hal, skladů, ale i bytových nebo půdních prostor. Turbíny typu *VV* jsou dostupné v nerezovém, měděném nebo duralovém provedení.



Obr. 27 Aplikace turbíny typu H-tech typ VV [31]



Obr. 26 Aplikace turbíny H-tech typ HV [31]



Tab. 16 Porovnání odsávací výkonnosti H-tech group typ VV [31]

Typ	Průměr hrdla turbíny $\varnothing D_H$	Odsávací výkonnost turbíny $Q_V [m^3 \cdot h^{-1}]$								
		Rychlost větru $v_W [m \cdot h^{-1}]$								
	[mm]	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VV200	200	65	105	145	186	230	300	350	390	420
VV260	260	150	220	300	410	500	670	810	870	970
VV355	355	180	250	400	520	650	760	890	1030	1115
VV400	400	250	380	500	660	900	1150	1300	1440	1600

#### 1.7.4.2 HYBRIDNÍ TURBÍNY-TYP HV

Hybridní turbíny typu *HV* jsou poháněny jednak silou působícího větru (rychlostí proudění větru  $v_W$ ), jejíž hodnota musí být dostatečně velká pro roztocení turbíny. Pakliže rychlost proudění větru  $V_W$  je malá nebo je bezvětrí, pohon turbíny je zajištěn elektromotorem o výkonu přibližně  $P_{mv} \approx 6\text{ W} - 25\text{ W}$ , který tak zajišťuje neustálý a trvalý odtah odpadního vzduchu z objektu. Číselná hodnota za označením *HV* udává průměr sacího hrdla turbíny  $\varnothing D_H$ .

#### 1.7.4.3 SPECIÁLNÍ TURBÍNA -TYP AP

Speciální turbíny typu *AP* jsou určeny pro odvětrávání místností s výskytem agresivního prostředí. Toto prostředí může být například spojeno s odvětráváním kanalizace, zemědělských objektů nebo místností se zvýšeným korozním zatížením. Rozměrově odpovídají ventilační turbíně typu VV 200. Turbína je dostupná pouze v nerezovém provedení.

#### 1.7.5 PŘÍSLUŠENSTVÍ VENTILAČNÍCH TURBÍN

Do skupiny příslušenství k ventilačním turbínám patří kromě náhradních součástí kompletu turbíny také doplňky a modifikace, které turbínu přizpůsobují blíže požadavkům potencionálního zákazníka. Jak již bylo zmíněno, obecně komplet turbíny tvoří rotační hlavice, stavitelný kloub a základna. Avšak mezi produkty jednotlivých výrobců je celá řada konstrukčních odlišností. Odlišný je také sortiment a dostupnost příslušenství u každého výrobce. Níže uvedené příslušenství poskytuje obecný přehled o těchto komponentech. [32]

##### 1.7.5.1 ZÁKLADNY PRO PRODLUŽOVACÍ DÍLY A ROZDVOJKY

Základny pro prodlužovací potrubí a rozdvojky jsou určeny pro usazení prodlužovacího potrubí všech průměrů, délek a rozdvojek do neprofilované střešní krytiny. Základny jsou obvykle dodávány v pozinkovaném provedení. Základny nejsou nijak profilované, tedy nejsou určeny pro šikmou střechu a profilovanou střešní krytinu. [32]

##### 1.7.5.2 PROSTUPOVÉ MANŽETY

Prostupové manžety jsou určeny pro usazení především do plechových tvarovaných krytin. Manžety zajistí vodotěsnost po dlouhou dobu a to i do velmi komplikovaných střešních plášťů. [32]

### 1.7.5.3 ROZDVOJKY

Pro některé případy odvětrání je nutné použít na vyústění vzduchotechniky dvě turbíny na jeden vývod. Tento případ se nejčastěji vyskytuje tam, kde jsou v jedné sběrné komoře umístěny dvě ventilační šachty nebo tam, kde je nutné zvýšit celkovou výkonnost průběžného odvětrání. Rozdvojky jsou obvykle dodávány v pozinkovaném provedení. Pro usazení rozdvojek je vhodné použít základny pro prodloužení. [32]

### 1.7.5.4 PRODLUŽOVACÍ POTRUBÍ

Prodlužovací potrubí se používají pro případ, kdy je třeba umístění ventilační turbíny výše nad plochu střechy. Díly jsou obvykle dodávány v pozinkované variantě. [32]

### 1.7.5.5 REGULAČNÍ KLAPKY

Slouží k regulaci (omezení) množství odsávaného vzduchu z daného prostoru, tedy k regulaci odsávací výkonnosti turbíny  $Q_V$ . V případě velmi vysokých hodnot rychlosti větru  $v_W$  její pomocí lze plně uzavřít sací hrdlo ventilační turbíny a zabránit tak jejímu možnému poškození. Rovněž v zimním období je vhodné kvůli tepelným ztrátám pomocí klapky uzavřít sací hrdlo turbíny a tím zamezit odsávání vzduchu z prostorů v zimě vytápěných, které jsou mimo toto období jindy odvětrávány.

Jedná se o nepřímou regulaci turbíny, omezí se odvod vzduchu (klapka může být v poloze otevřeno/zavřeno). Výrobci nabízí regulační klapky se dvěma způsoby ovládání. A to jako mechanickou klapku, která se ovládá ručně. Druhým způsobem je použití elektromechanické klapky (servo pohonu).

Elektromechanické klapky jsou vybaveny nezbytnou elektronikou pro funkce, které použitím této klapky jsou uživateli dostupné. Jedná se například o nastavení časového spínače, možnosti dálkového ovládání nebo použití ručního spínače. [28], [32], [37]

### 1.7.5.6 ELEKTRICKÉ VENTILÁTORY

Většina výrobců nabízí kromě klasických ventilačních turbín i turbíny hybridní. Součástí hybridních turbín jsou elektrické ventilátory, které zajišťují při bezvětrí nebo při minimálních hodnotách rychlosti větru trvalý garantovaný odtah odpadního vzduchu z daného prostoru.

Ventilátor může být ve funkci „sepnuto“ i pokud je velikost rychlosti větru  $v_W$  dostatečná a zajistit tak zvýšení odsávací výkonnosti  $Q_V$  pro požadovaný odtah. Především však jím lze docílit alespoň minimální hodnoty odsávací výkonnosti  $Q_V$ . Ventilátor je obvykle umístěn mezi rotační hlavicí a stavitelným hrdlem (kloubem). Výkon elektrického motoru ventilátoru je u většiny výrobců přibližně do  $P_{mv} \approx 30 \text{ W}$ .



Obr. 28 Regulační lámací klapka [37]



Obr. 29 Elektrický ventilátor [37]

Motorek je vybaven nezbytnou elektronikou pro funkce, které jsou uživateli dostupné. Jedná se například o nastavení časového spínače, možnosti dálkového ovládání nebo snímání otáček rotační hlavice. [32], [37], [28]

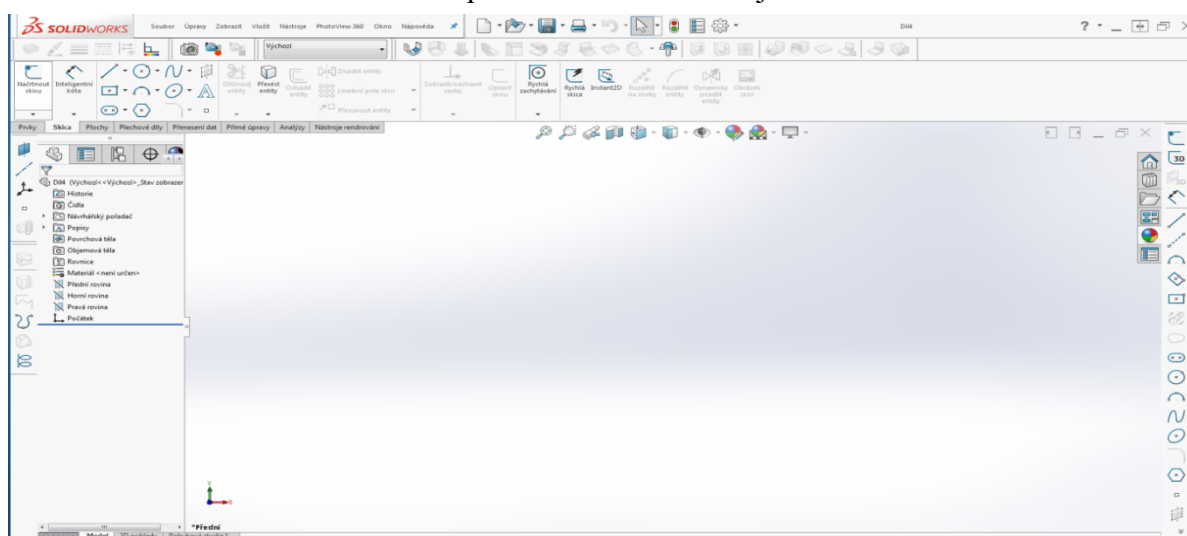
#### **1.7.5.7 OSTATNÍ DOPLŇKY PRO VENTILACI**

Kromě výše zmíněného příslušenství se používají doplňky pro ventilaci jako ventilační potrubí, redukce potrubí, ventilační mřížky, které mohou být neregulovatelné nebo regulovatelné. Další skupinou jsou anemostatické ventily (talířové ventily) přívodní nebo odvodní. Jedná se o regulovatelný ventil na průtok vzduchu, který je opatřen těsnícím kroužkem.[32],[37],[28]

## 2 MODELOVÁ 3D DOKUMENTACE VENTILAČNÍCH TURBÍN

V teoretické části (1. kapitole) byla popsána historie ventilačních turbín, důvody jejich použití, jednotlivé typy a další skutečnosti vztahující se k danému tématu ventilačních turbín. V této kapitole autor přechází k praktické části práce. Na základě zadání DP je tato kapitola zaměřena na tvorbu 3D modelové dokumentace alternativních stavebnicových regulovatelných ventilačních turbín dle pokladů vedoucího práce. Výstupem jsou CAD<sup>14</sup> modely jednotlivých dílů a sestav. Sací hrdla turbín jsou provedena pro připojení potrubí o průměru  $\varnothing D_p = 355 [mm]$ .

Zvláštní pozornost byla při tvorbě modelů věnována mechanické regulaci (regulační klapce) a přídatnému axiálnímu ventilátoru, jehož základní návrh je následně obsahem 3. kapitoly této práce. Jako nástroj pro tvorbu 3D modelů byl zvolen parametrický<sup>15</sup> CAD software Solidworks 2016. Ukázka z prostředí Solidworksu je na Obr. 30.



Obr. 30 Prostředí softwaru Solidworks

### 2.1 MODEL EDMONDS HURRICANE

Model *HURRICANE* - průmyslová turbína firmy *Edmonds* je jedním ze zpracovaných 3D modelů. Podrobnosti o tomto typu byly již uvedeny v podkapitole - 1.7.2.2, proto zde již nejsou dále zmíněny. V následujících podkapitolách jsou blíže popsány funkce a parametry jak samotných dílů, tak sestav.

#### Dílní součásti modelu Edmonds Hurricane:

- Potrubí
- Dolní a horní obruč
- Rotor
- Dolní a horní kotouč
- Lopatka
- Hřídel
- Otočné a statické rameno

<sup>14</sup> Systémy CAD (Computer Aided Design) představují počítačovou podporu konstruování a tím umožňují nahradit rutinní práci konstruktéra moderními postupy (např. tvorba výkresové dokumentace atd.). [9], [17]

<sup>15</sup> Za parametrický model lze považovat takový, který je matematicky popsán pomocí parametrů (proměnné, výrazy nebo rovnice). [9]

- h) Ložiskový domeček a ložiska
- i) Střecha
- j) Mechanická klapka
- k) Ventilátor

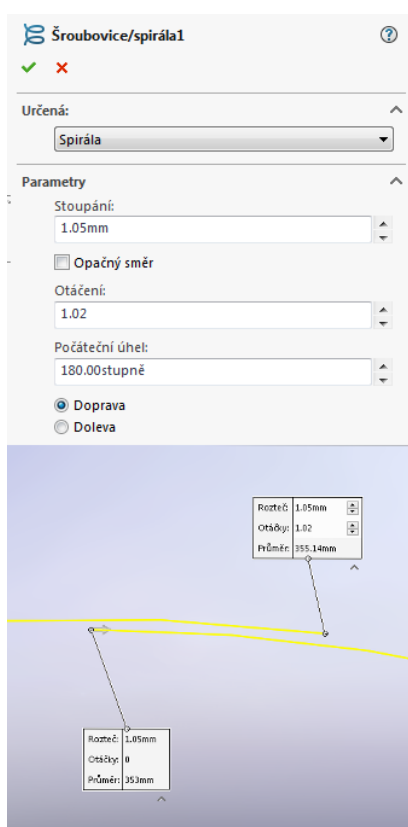
## 2.1.1 DÍLY SESTAVY

Díly jsou seřazeny dle pořadí, ve kterém byly postupně vytvořeny.

### 2.1.1.1 POTRUBÍ

Dle reálné předlohy zadání se jedná o polykarbonátovou tubu o vnějším průměru  $\varnothing D_p = 355 [mm]$ , tloušťce stěny plechu  $t_s = 1 [mm]$  a délce  $L_p = 1025 [mm]$ . V případě plechového potrubí je to plech zkroužený do příslušných rozměrů.

Z hlediska modelování se nejedná o pouhé vysunutí skici plechového dílu jako mezikružší o daných rozměrech, ale je třeba využít prvek Solidworksu - **Šroubovice/spirála**, kterým se zajistí požadovaná hodnota *překrytí* obou konců plechu po jeho zkroužení, případně počet těchto *překrytí*, který je v tomto případě jeden. Model tak získá i reálnější vzhled. Ten ještě doplňuje použití materiálu - *polykarbonát* z **knihovny materiálů**. Naproti tomu tím, že se jedná o spirálu a ne o kružnici, použití některých prvků nemusí fungovat dle očekávání.



Obr. 31 Model potrubí-tvorba spirály

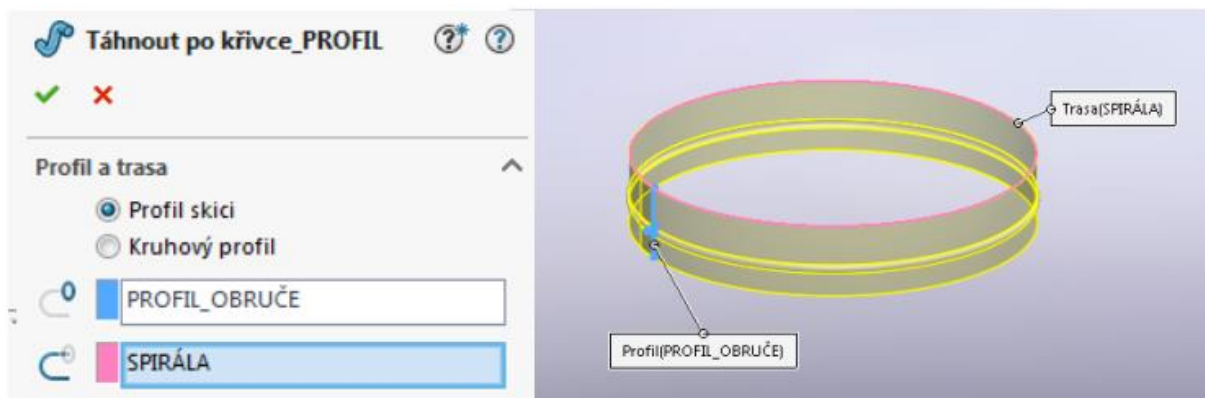


Obr. 32 Render potrubí

### 2.1.1.2 DOLNÍ A HORNÍ OBRUČ

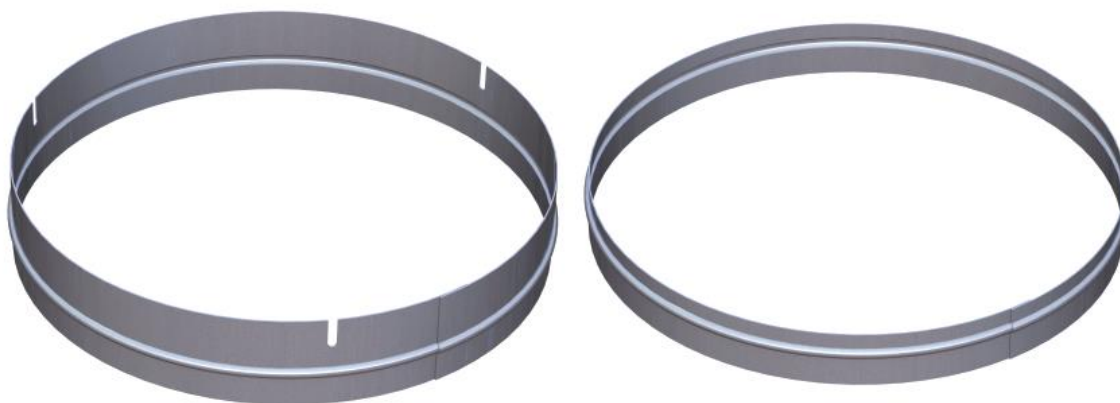
*Dolní i horní obruč* je z ocelového plechu o tloušťce  $t_s = 1 [mm]$ , který je zkroužen. Obruče zajišťují fixaci potrubí díky nýtům, jimiž jsou následně spojeny. V horní obruči jsou navíc vyvrtány drážky pro připojení statických ramen.

Z hlediska modelování je postup obdobný jako při tvorbě potrubí (charakter *spirály*) s tím rozdílem, že po obvodu obruče je veden *lem* (prolis) a tak je vhodné použít prvek - **Tažení po křivce**, který vede daný *profil* (skicu profilu) po příslušné *trajektorii* (skice křivky).



Obr. 33 Tvorba modelu horní a dolní obruč Edmonds Hurricane

Výsledek této operace je zobrazen na Obr. 33 výše. Pro *horní obruč* se ještě provede vybrání po obvodu obruče, které tvoří soustava tří drážek pro připojení statických ramen. Šířka drážek  $t_d = 6$  [mm] pro průchod šroubu<sup>16</sup> M5. Nakonec je obručím přiřazen příslušný materiál a konečná podoba modelu je na Obr. 34 níže.



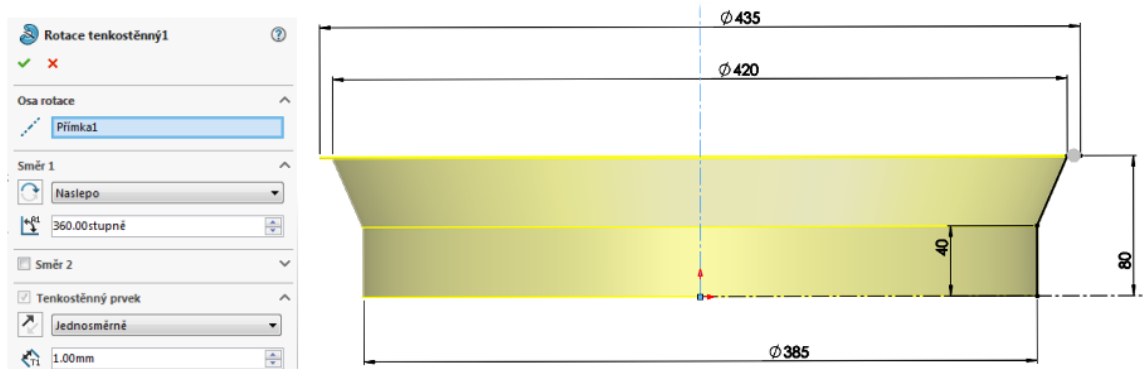
Obr. 34 Model horní a dolní obruč Edmonds Hurricane

### 2.1.1.3 ROTOR

*Rotor* je součástí hlavice, která jako celek koná rotační pohyb. Tento pohyb je vyvozen otáčením *hřídele*, se kterým je rotor spojen pomocí *nosných otočných ramen* a *ložiskových domečků* šroubovým spojem. Tloušťka stěny plechu rotoru  $t_s = 1$  [mm].

Z hlediska modelování zde není žádná zajímavost, snad jenom možnost využití prvku - **Přidání rotací** a zatržení volby jako *tenkostěnný*. To umožní případnou rychlejší editaci tloušťky stěny  $t_s$  součásti již jako *prvku* a ne jako *skici*. Tomu však přísluší odpovídajícím způsobem nakreslená skica - viz Obr. 35.

<sup>16</sup> Konkrétní typy a rozměry spojovacího materiálu (šrouby, matice, podložky atd.) jsou uvedeny v literatuře [15], [10] a [18].

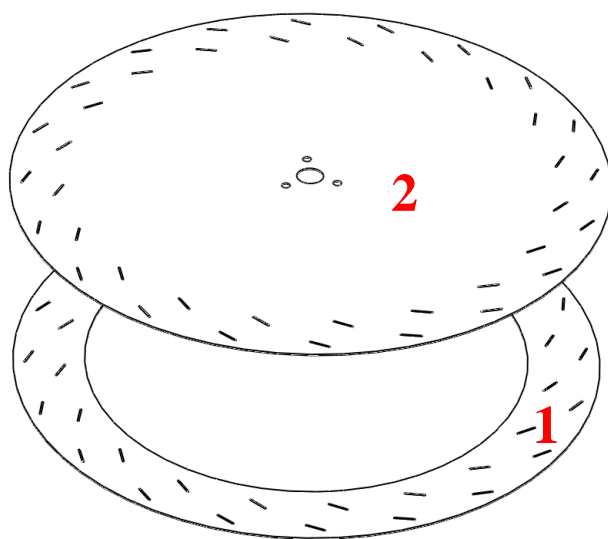


Obr. 35 Tvorba modelu rotor Edmonds Hurricane

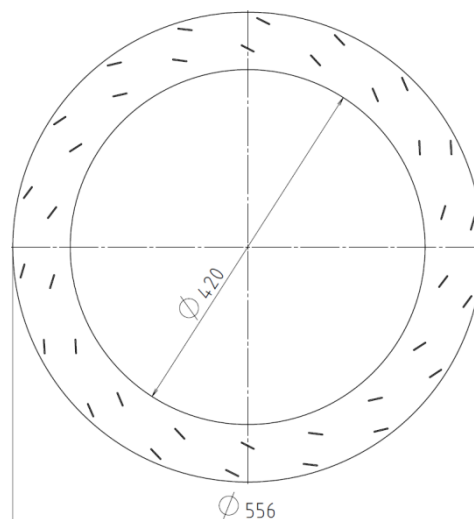
#### 2.1.1.4 DOLNÍ A HORNÍ KOTOUČ

Součástí rotující hlavičky je dále dvojice kotoučů, k nimž jsou uchyceny *lopatky* turbíny. Oba kotouče jsou vyrobeny z plechu o tloušťce stěny  $t_s = 1,2$  [mm]. *Dolní kotouč* je spojen pevně s *rotozem* pomocí nýtového spoje. *Horní kotouč* je spojen přes lopatku se spodním kotoučem. Toto spojení je realizováno polem drážek po obvodu kotoučů, do kterých se přihrnou nastřižené konce úchytů lopatek, tím se součásti vzájemně spojí. Horní kotouč má navíc průchozí otvor pro volný průstup *hřídele* a soustavu děr pro jeho uchycení.

Z hlediska modelování dílu je nejpodstatnější správná korekce mezi *skicou drážek* pro uchycení lopatek na kotoučích a *tvarem samotné lopatky*, aby následně v sestavě nedocházelo k polohovým odchylkám ve vzájemné poloze součástí.



Obr. 37 Model dolní a horní kotouč Edmonds Hurricane; 1 – dolní kotouč, 2 – horní kotouč



Obr. 36 Model dolní kotouč Edmonds Hurricane - horní pohled

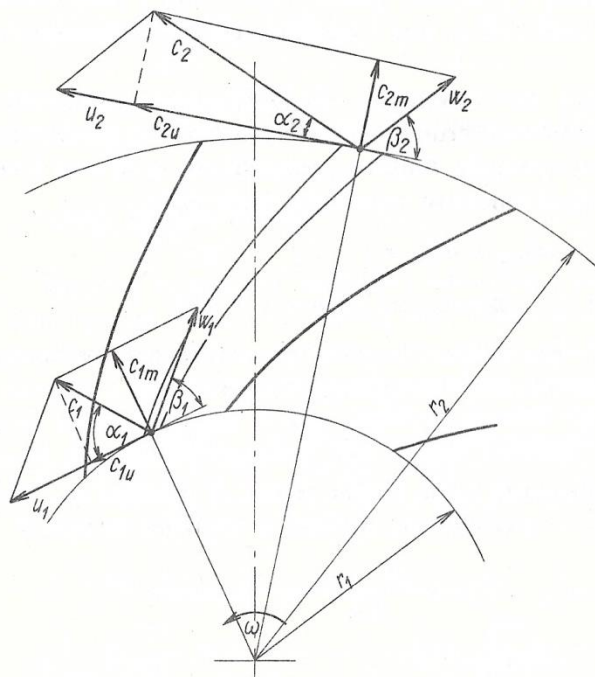
#### 2.1.1.5 LOPATKA

Turbína *Edmonds Hurricane* je konstruována jako *radiální oběžné kolo* s dozadu zahnutými lopatkami, pro něž platí podmínka  $\beta_2 < 90^\circ$ . Úhel  $\beta_2$  je úhlem ležícím mezi vektorem unášivé rychlosti  $\vec{u}_2$  a vektorem relativní rychlosti  $\vec{w}_2$ . Index 2, potom značí, že se jedná úhel na výstupu z radiálního oběžného kola-viz Obr. 38. Při návrhu tvaru lopatek

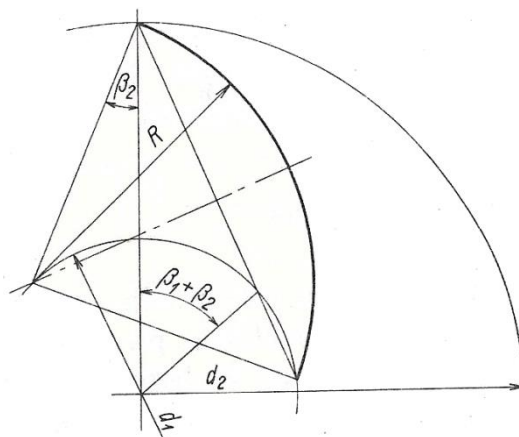


turbíny *Edmonds Hurricane* je zde jistá podobnost s návrhem lopatek oběžného kola radiálního ventilátoru. Ekonomicky nejvýhodnější se jeví použití jednoduchých lopatek z plechu, tedy lopatek s konstantní tloušťkou profilu podél tělivy lopatky a to je i tento případ. Avšak pro náročnější aplikace *radiálních ventilátorů* se používají *profilové lopatky*, tedy lopatky s proměnnou tloušťkou profilu podél tělivy, které dosahují výrazně lepších aerodynamických vlastností.

Základními tvary lopatek radiálních ventilátorů jsou lopatky *přímé*, které jsou používány zřídka, dále jsou to lopatky ve tvaru *kruhového oblouku* nebo *logaritmické spirály*. V tomto případě se jedná o lopatky ve tvaru kruhového oblouku. [11], [2]



Obr. 38 Proudnice v radiálním oběžném kole [2]



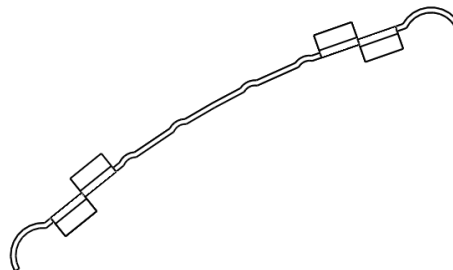
Obr. 39 Schéma konstrukce střednice lopatky ve tvaru kruhového oblouku [2]

Problematika řešení rychlostních trojúhelníků a tvaru lopatek, konkrétně pro axiální ventilátor je detailněji popsána v následující kapitole - 3.1 diplomové práce.

Z hlediska vytváření modelu, vzhledem k jednoduchému základnímu tvaru plechové lopatky zde není žádný zásadní problém a tak lze rovnou aplikovat prvek - **Vysunout tenkostěnný**, kterému přísluší *skica* zachycující profil (tvar) lopatky. Lopatku je vhodné modelovat jako *plechový díl* kvůli zjednodušení následné tvorby dolních a horních úchytů lopatky. V částech lopatky, kde se nachází tyto úchyty, je možné převést *oblouk* na *přímku*, která *tečně* navazuje ke zbytku oblouku lopatky z důvodu právě modelování úchytů, který jinak často vykazuje sebe protínající se nebo defektní konfliktní geometrii.



Obr. 41 Model lopatky turbíny Edmonds Hurricane



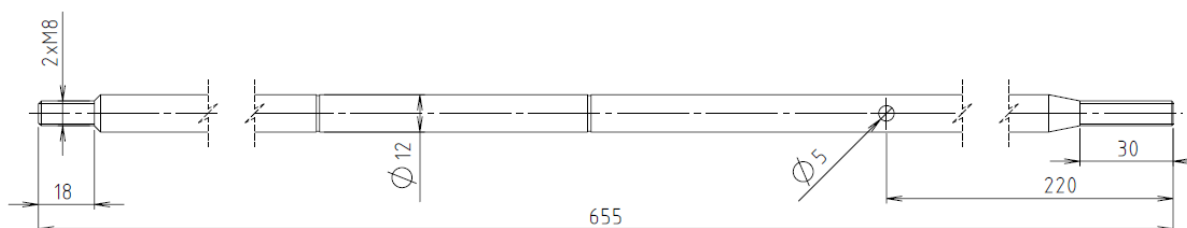
Obr. 40 Model lopatky turbíny Edmonds Hurricane-horní pohled



### 2.1.1.6 HŘÍDEL

*Hřídel* je umístěn kolineárně s osou symetrie ventilační turbíny (tedy je kolineární s osami všech výše zmíněných součástí rotačního tvaru. Průměr hřídele  $\varnothing d_h = 12$  [mm]. Na obou koncích hřídele je v příslušné délce vytvořen vnější metrický závit M8, jednak pro uchycení hřídele k *hornímu kotouči*, ale také pro připojení přídavného *axiálního ventilátoru* umístěného pod mechanickou klapkou. Do hřídele je vyvrtán otvor o průměru  $\varnothing d_{kl} = 5$  [mm] kvůli připojení *osy klapky*, která prochází tímto otvorem. Dále jsou na hřídeli obrobena dvě drážky pro pojistné kroužky, kterými jsou v axiálním směru pojištěna *ložiska* turbíny proti posuvu.

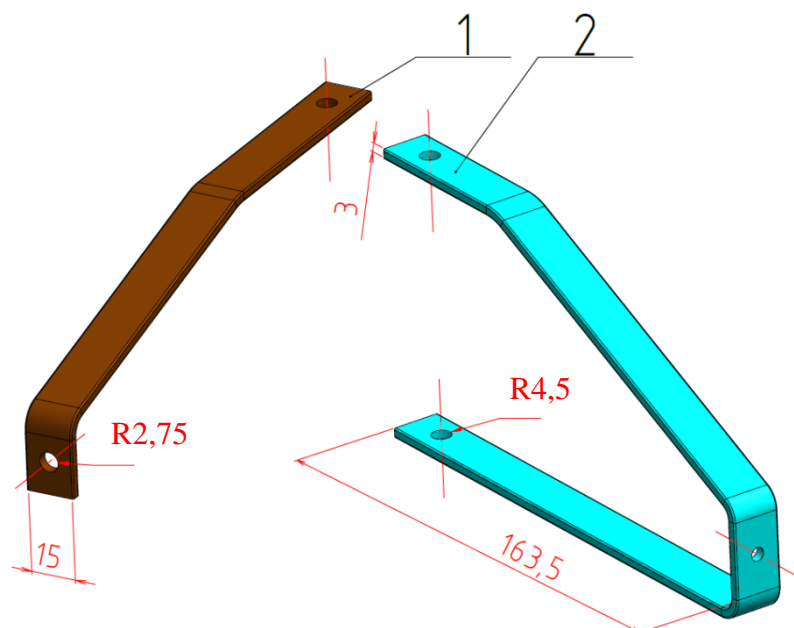
Z hlediska modelování je to nejjednodušší součást, která vznikne především prvkem - **Přidání rotací**, tedy rotací nakreslené *skici* vůči zvolené referenční ose. Následně se vytvoří otvor a drážky prvkem - **Odebrání vysunutí**, **Odebrání rotací** a prvkem - **Průvodce děr** se vytvoří metrický závit. Výsledek je na Obr. 42 níže.



Obr. 42 Model hřídel turbíny Edmonds Hurricane

### 2.1.1.7 STATICKÉ A OTOČNÉ RAMENO

*Statické a otočné rameno* tvoří nosnou konstrukci turbíny. Statické rameno je na jednom svém konci spojeno s *ložiskovými domečky* a na druhém s *dolní obručí* potrubí. V obou případech je spojení zajištěno šrouby s metrickým závitem M5 a M8, které zajišťují stabilní statické spojení.



Obr. 43 Model ramen turbíny Edmonds Hurricane;

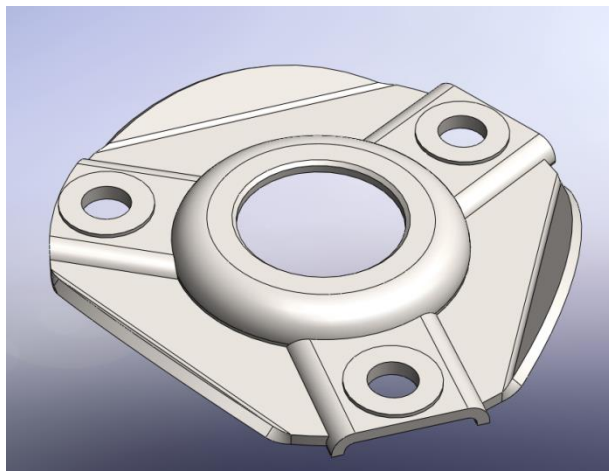
1 – otočné rameno; 2 – statické rameno

Otočné rameno je spojeno obdobně jako statické rameno s *ložiskovým* domečkem na jedné straně, na druhé je, ale připevněno tentokrát ke stěně *rotoru*. Spojení je realizováno rovněž šrouby s metrickým závitem *M5*. Z hlediska modelování jde o tvorbu jednoduchého *plechového dílu* o daných rozměrech. Výsledek modelování je zobrazen na Obr. 43. Rameno hnědé barvy je dynamické, tyrkysové je statické.

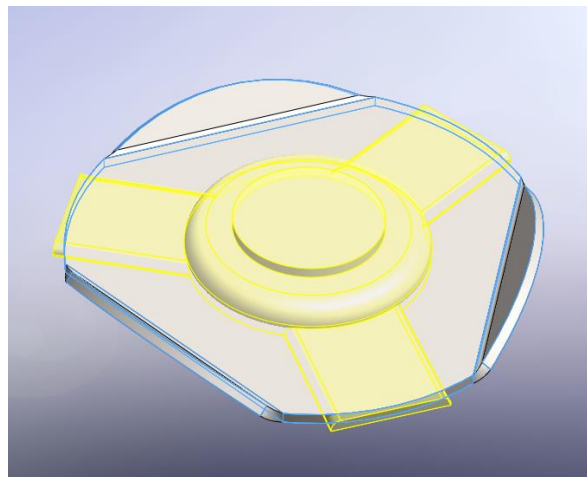
#### 2.1.1.8 LOŽISKOVÝ DOMEČEK A LOŽISKA

*Hřídel* turbíny je uložen ve dvou jednořadých kuličkových ložiskách (Ložisko ČSN 02 4630-6001), které zajišťují jeho plynulou rotaci bez chvění a rázů při provozu turbíny. *Ložiska* jsou zcela uzavřena - mazána plastickým mazivem, kterému zabraňují v úniku kryty ložisek. Tyto ložiska jsou uloženy v *prolisech* ložiskových domečků. Každý ložiskový domeček se jako celek skládá ze dvou půl-domků, které jsou navzájem k sobě sjednoceny svými spodními plochami. Ložiskové domečky mají po obvodu vyvrtány díry pro připojení *statických* a *otočných ramen* šrouby *M8*. Tloušťka stěny hliníkového plechového polotovaru domečku je  $t_s = 1,5$  [mm]. Jeho délkové rozměry (jednotlivé průměry atd.) jsou vázány na rozměrové parametry zvoleného (použitého) ložiska.

Z hlediska modelování se jedná o složitější součást neboť pro dosažení realistického vzhledu je nutná znalost panelu-*Plechové díly*. Postup je však poměrně krátký. V prvním kroku se prvkem-*Základní plech* vysune kružnice o příslušném (vnějším) rozměru, v druhém kroku se použije prvek-*Ohyb ze skici*, který provede ohnutí plechové součásti podle uživatelem definovaného tvaru *skici*. Tím je základní podoba součásti hotová. Nyní se založí *Nový díl*, ve kterém se vytvoří prvkem-*Přidání vysunutím* objem ve tvaru požadovaného *prolisu* a následně se použije prvek-*Tvarovací/lisovací nástroj*. Jeho možnosti použití a chování je vhodné znát při tvorbě této a jí podobných součástí viz nápověda programu [27].



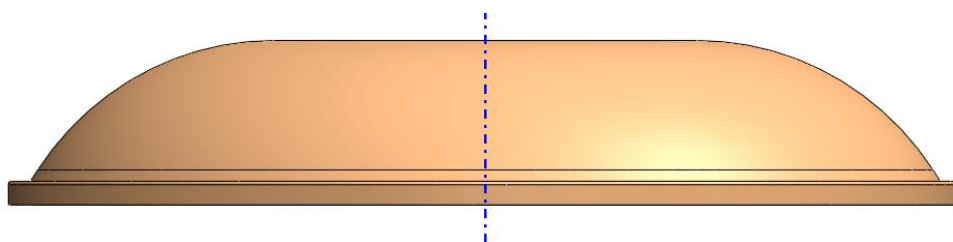
Obr. 45 Model půl-domku ložiskového domečku turbíny Edmonds Hurricane



Obr. 44 Tvorba modelu půl-domek turbíny Edmonds Hurricane

#### 2.1.1.9 STŘECHA

*Střecha* tvoří horní část rotační hlavice. Pod jejím pláštěm o tloušťce stěny plechu  $t_s = 1$  [mm] je umístěno *spojení hřídele, horního kotouče a distančního kroužku* šrouby o velikosti *M8*. *Střecha* je připojena k hornímu kotouči pomocí nýtového spoje po jejím obvodu. Z hlediska modelování se jde o jednoduchou součást, kde je vhodné použití *pravé roviny* pro *skicu profilu* a její následné *rotování* kolem centrální osy využitím prvku-*Přidání rotací*.



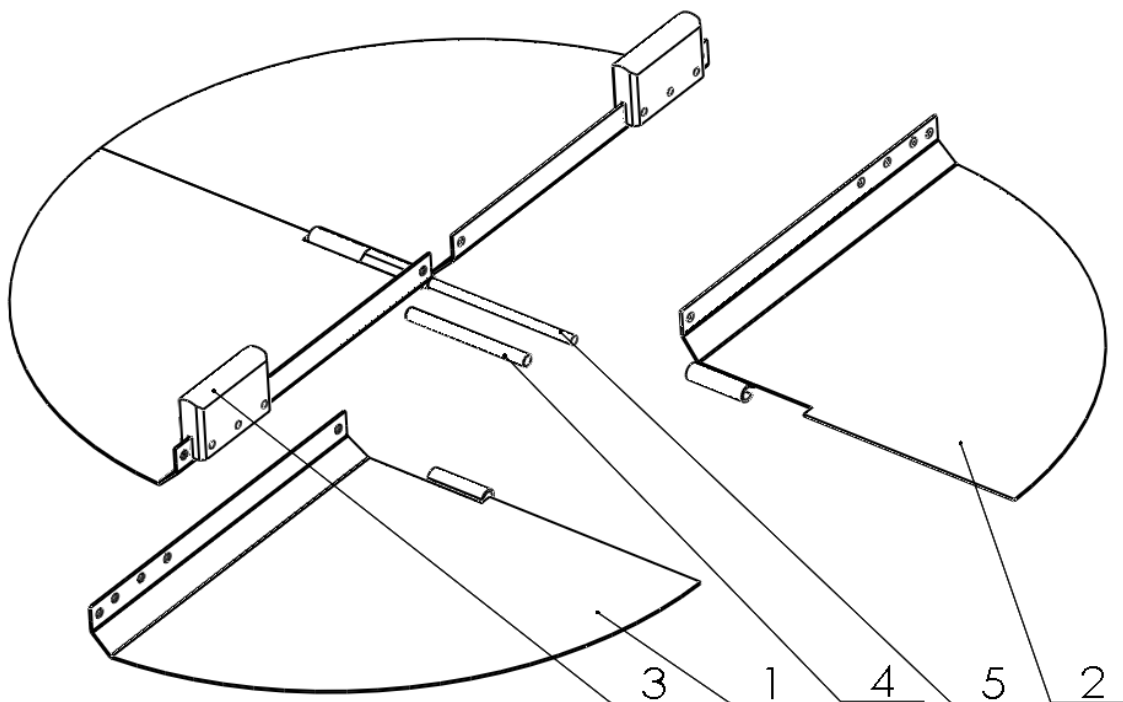
Obr. 46 Model střecha turbíny Edmonds Hurricane

### 2.1.2 MECHANICKÁ REGULACE „ČTVRT-KLAPKOU“

Hlavním smyslem použití *klapky* je omezení průtoku vzduchu ventilačním potrubím, to může být z několika různých důvodů, které byly již popsány v 1. kapitole. Tato klapka se z pohledu sestavy skládá ze čtyř *čtvrt-klapek* na pozicích **1** a **2**, které jsou tvářením a obráběním plechu zpracovány do tvaru jako na Obr. 47. Každé dvě *čtvrt-klapky* jsou navzájem identické.

Všechny *čtvrt-klapky* mají po svém vnitřním okraji *pant*, jehož osa je kolineární s osou horizontálního otvoru vyvrtaného do *hřídele* pro uložení *osy klapky*, která je na pozici **5**. Osa klapky prochází hřídelem a také po celé délce pantu. Osa klapky je navíc uložena v *mosazné trubce*, ta je zobrazena na pozici **4**. Jednotlivé části klapky jsou při sestavě spojeny šrouby a maticemi. Následně jsou na obou vnějších spojených koncích v příslušné vzdálenosti umístěny *vývažky*, které jsou na Obr. 47 označeny pozicí **3**.

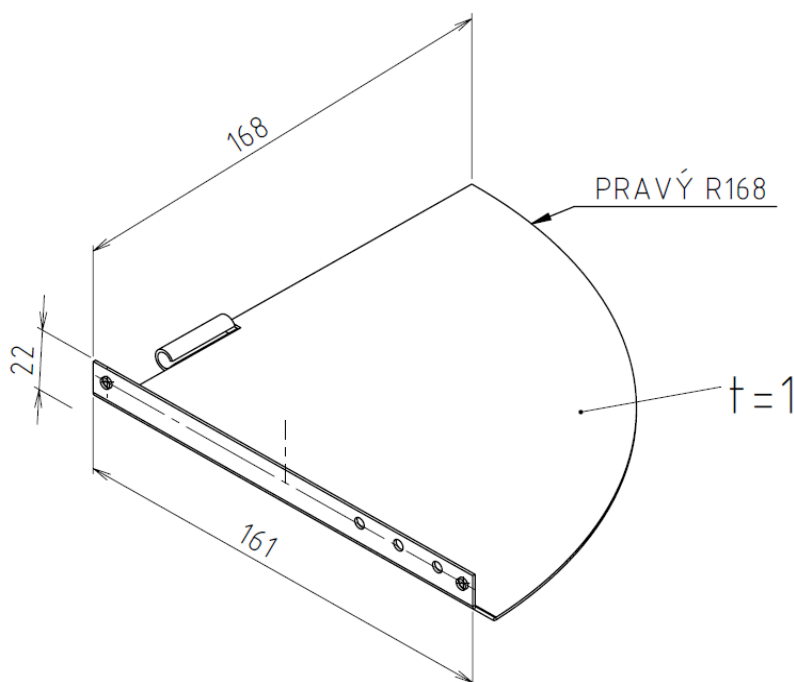
Parametry jako hmotnost a poloha vývažku lze ovlivnit zavírání klapky. Tyto parametry ovlivňují při zvyšující se rychlosti otáčení turbíny velikost odstředivé síly působící na klapku resp. na vývažky. Vlivem této rychlosti se začíná klapka zavírat a to tak, že se obě spojené poloviny klapky pohybují *symetricky* vůči ose otvoru v hřídeli resp. ose pantu jednotlivých klapek. Na Obr. 47 je zobrazena částečně rozebraná sestava klapky bez spojovacích součástí.



Obr. 47 Rozložená sestava-mechanická čtvrt-klapka; 1,2 – plech čtvrt-klapka; 3 – vývažek; 4 – mosazná trubka; 5 – nerezová osa

### 2.1.2.1 ČTVRT-KLAPKA

Čtvrt-klapka je vyrobena z hliníkového plechu o tloušťce stěny  $t_s = 1$  [mm] a má přibližný tvar při horním pohledu čtvrtiny kružnice. Jak již bylo zmíněno, na vnitřní straně má vytvořený *lem*, který spolu s ostatními součástmi tvoří *pant* a tím lze měnit pozici klapky mezi polohou otevřeno/zavřeno. Z hlediska modelování se jedná o tvorbu *plechového dílu*, u kterého se po vysunutí základní obrysové skici prvkem- **Základní plech** aplikuje prvek- **Lem z hrany**, který zajistí ohnutí profilu plechu do požadované polohy a to hned dvakrát.

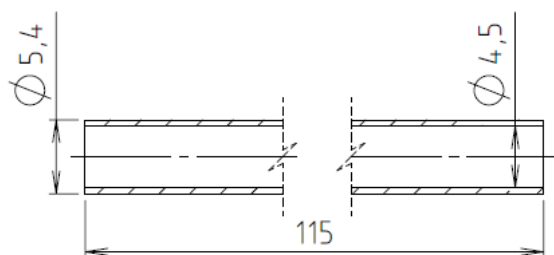


Obr. 48 Základní rozměry plechu čtvrt klapky

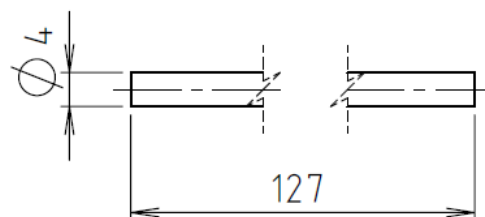
Následně stojí za zmínku využití prvku-**Okrajový lem** pomocí, kterého se docílí vhodného tvaru *lemu-pantu* na vnitřním okraji čtvrt klapky. Obdobného výsledku, by bylo dosaženo použitím prvku-**Obruba** z nástrojů- **Plechové díly**.

### 2.1.2.2 OSA KLAPKY

Její funkce byla popsána v kapitole-2.1.2, proto zde není dále uvedena. Skládá se ze dvou částí a to *nerezové osy* a *mosazné trubky*. Mosazná trubka je dále rozdělena na dvě délkově ekvivalentní části. Součásti osy klapky jsou na Obr. 47 označeny pozicí 4 a 5.



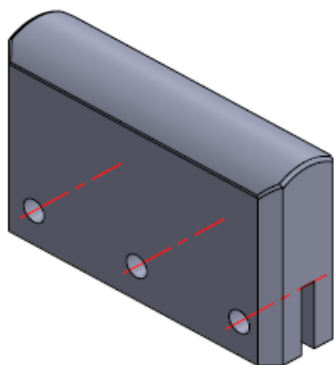
Obr. 50 Sestava osa klapky-mosazná trubka



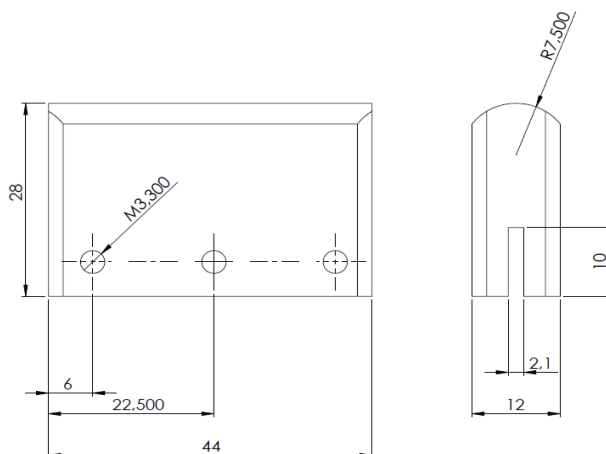
Obr. 49 Sestava osa klapky-nerezová osa

### 2.1.2.3 VÝVAŽEK

Polotovarem *vývažku* je silný ocelový plech, který je následně obroben do požadovaných rozměrů a poté, jsou v něm vyvrtány tři díry pro uchycení *vývažku* pomocí šroubu ke *klapce*. Jsou použity dva *vývažky*, jejichž umístění bylo naznačeno na Obr. 47 pozici 3.



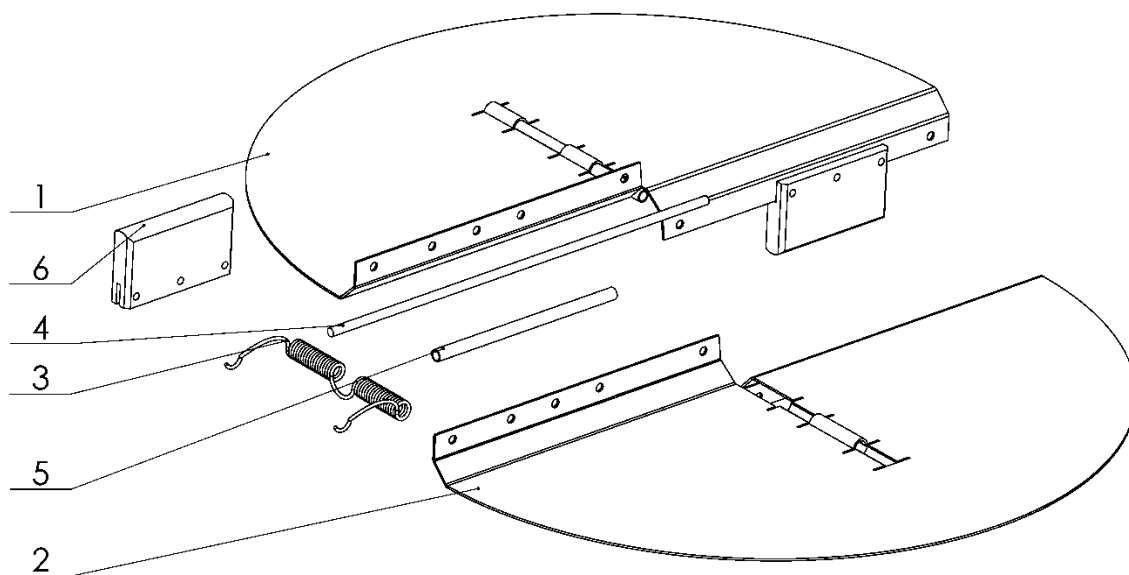
Obr. 51 Model vývažek klapky-izometrický pohled



Obr. 52 Model vývažek klapky

### 2.1.3 MECHANICKÁ REGULACE „PŮL-KLAPKOU“

Další konstrukcí mechanické regulace je použití tzv. *půl-klapky*. Opět cílem je omezení objemového průtoku  $Q_V$  vzduchu potrubím. Na Obr. 53 je zobrazena sestava *půl-klapky*, která se skládá z několika hlavních částí, z nichž některé již byly blíže popsány v kapitole-2.1.2, proto nebudou dále blíže popsány. Jedná se zejména součásti na pozicích 4- *nerezová osa*, 5- *mosazná osa*, 6- *vývažek klapky*. Naopak se v závislosti na funkci změnila konstrukce plechových součástí samotné klapky na pozicích 1- *Levá klapka*, 2- *Pravá klapka* a dále přibyla zkrutná (torzní) pružina, která je na pozici 3- *Zkrutná pružina*.



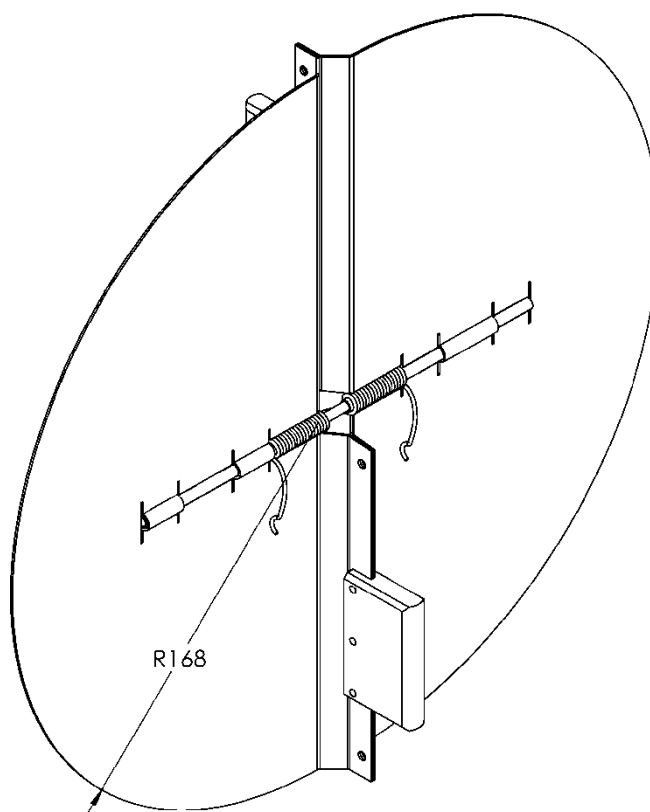
Obr. 53 Rozložená sestava-mechanická půl-klapka; 1, 2 – plech půl-klapka; 3 – zkrutná pružina; 4 – nerezová osa; 5 – mosazná trubka; 6 - vývažek

*Osa klapky* je obdobně jako u minulého typu regulace kolineární s osou otvoru v hřídeli. Tímto otvorem prochází nerezová osa klapky (pozice 4), která je dále vedena prolisy v obou plechových částech 1 a 2 klapky. Tato nerezová osa je uložena v mosazné trubce (pozice 5), jež je s ní soustředná. Mosazná trubka zároveň tvoří vodící trn pro soustředné umístění zkrutné pružiny (pozice 3). Na Obr. 53 není zakreslen spojovací materiál klapky (šrouby, matice atd.).

Hřídel turbíny, na němž je uložena klapka, se v závislosti na působení rychlosti větru, otáčí určitými otáčkami  $n$ . Vlivem zvyšující se rychlosti větru  $v_w$  se zvyšují i otáčky turbíny  $n$ . Po dosažení určité hodnoty  $n$  je žádoucí, aby se klapka zavřela a nedošlo tak k poškození turbíny. Tomu napomáhají dva vývažky klapky daných rozměrů a o hmotnosti  $m_v$ . Ty jsou umístěny ve vzdálenosti  $r_v$  od osy rotace. Na tyto vývažky působí při otáčení klapky kromě síly tíhové a obvodové, síla odstředivá  $F_{ods}$ . Jejím vlivem, dochází k uzavírání klapky po dosažení určitých otáček  $n$ . Proti ní působí síla zkrutné pružiny  $F_p$ , jež udržuje klapku v otevřené poloze. Jakmile nastane okamžik, kdy  $F_p < F_{ods}$ , klapce již pružina nebrání v jejím uzavření.

Následně při snížení otáček a zpětnému otevírání klapky zajišťuje torzní pružina vlivem své tuhosti její plynulé otevírání. Případné korekce pro konkrétní otáčky lze provést úpravou parametru jako hmotnost vývažku  $m_v$ , poloha vývažku od osy rotace  $r_v$  nebo záměnou parametrů pružiny (velikosti síly pružiny  $F_p$  v závislosti na délce pracovního ramena pružiny).

Na Obr. 54 je zobrazen izometrický pohled na mechanickou půl-klapku v pracovní poloze-otevřeno.

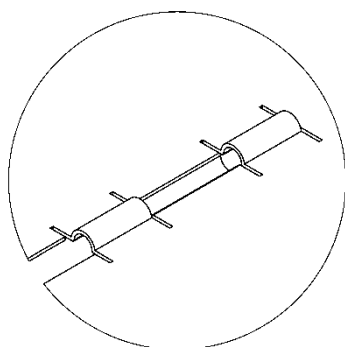


Obr. 54 Sestava půl klapky-izometrický pohled

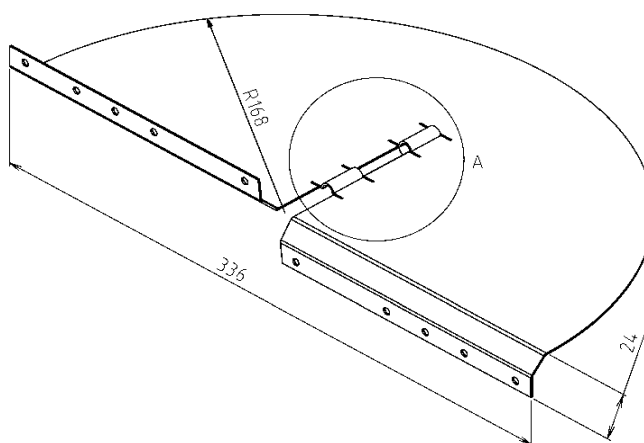
### 2.1.3.1 PŮL-KLAPKA

*Půl-klapka* je vyrobena z hliníkového plechu o tloušťce stěny  $t_s = 1$  [mm] a má přibližný tvar při horním pohledu poloviny kružnice o poloměru  $r_k = 168$  [mm]. Samotná plechová část klapky je tvořena dvěma půl-klapkami, které jsou navzájem spojeny šrouby, obdobně jako tomu bylo v kapitole-2.1.2 u čtvrt-klapky.

Z hlediska modelování se jedná o tvorbu *plechového dílu*, u kterého se po vysunutí základní obrysové *skici* prvkem-**Základní plech** aplikuje prvek-**Lem z hrany**, který zajistí ohnutí (tváření) *profilu* plechu do požadované polohy a to hned dvakrát po  $45^\circ$ . Na párové *půl-klapce* se provede ohnutí v opačném směru. To je důležité jednak z hlediska vytvoření dostatečného prostoru pro prostup *hřídele*, ale také pro vytvoření ploch, na kterých jsou později vytvořeny (obrobeny) otvory. Následně se vymodeluje *prolis* pro vedení *osy klapky* u obou půl-klapek, takže se založí **Nový díl**, ve kterém se vytvoří prvkem-**Přidání vysunutím** objem ve tvaru požadovaného prolisu a následně se použije prvek-**Tvarovací/lisovací nástroj**. U něj se vyberou *plochy*, které budou sloužit pro umístění na *tvarované součásti*. Dále se vyberou plochy, které chceme případně odstranit. Tím je tvorba *lisovacího nástroje* u konce a zbývá jej aplikovat na *tvarovanou součást* jejím přetažením na konkrétní plochu. Možnosti použití a chování tohoto prvku je vhodné znát při tvorbě této a jí podobných součástí v souvislosti s tvorbou plechových dílů viz nápověda Solidworks [27].



Obr. 56 Model půl-klapka  
(detail vytvoření prolisu)



Obr. 55 Model půl-klapka

### 2.1.3.2 ZKRUTNÁ PRUŽINA

Zkrutná pružina je šroubovitá válcová pružina schopná přijímat vnější síly působící v rovinách kolmých k ose vinutí vyvolávající krouticí moment ve smyslu svinování nebo rozvinování. Má dvě ramena. Ramena slouží k přenosu krouticího momentu na tělo pružiny. Pracovní rameno pružiny je zatěžované rameno, které během zatěžování pružiny otáčí kolem její osy ve směru působící síly. Opěrné rameno si při zatěžování pružiny zachovává svoji polohu. Volba provedení ramen závisí na požadovaném způsobu uložení pružiny, jejich rozměrech a požadované vzdálenosti působistě zatížení od osy pružiny. [15] Drát zkrutné pružiny je namáhán ohybem<sup>17</sup>. Při jejím zatěžování ve směru svinování dochází k zmenšování

<sup>17</sup> Teorie namáhání ohybem je blíže popsána spolu s příklady v [7] a [6]. Často je úkolem stanovit průhyb nebo natočení profilu, k čemuž lze při výpočtu např. využít diferenciální rovnice průhybové čáry, Castiglianovu větu nebo Maxwell-Mohrovu variantu Castiglianovy věty. [7]

průměru pružiny a současně k nárůstu její délky. Pružiny s průměrem drátu do cca. 16 mm se obvykle navíjejí za studena. Mezi specifické vlastnosti patří vhodnost použití pro malé a střední zatěžovací momenty, lineární pracovní charakteristika a další. [34]

V tomto případě se jedná o použití dvojité zkrutné pružiny (se dvěma těly) se speciálními rameny. Geometrií se dvěma těly se sníží tření mezi závity pružiny.

Jako materiál drátu pružiny je použita korozivzdorná ocel *X5CrNiMo17-12-2* dle [15]. Průměr drátu pružiny  $\varnothing d = 1,5$  [mm], o mechanických vlastnostech drátů třídy SM dle [15]. Počet celých činných závitů na obou tělech pružiny  $n = 2 \times 18$  [–]. Vnitřní průměr pružiny  $\varnothing d_i = 6$  [mm]. V tomto případě je úhel  $\beta = 0$  [°]. Následující rovnice jsou převzaty z [15].

### Návrh zkrutné pružiny:

- 1) Neceločíselná část počtu činných závitů  $n_p$ :

$$n_p = \frac{\beta}{360^\circ} [-] \quad 2.1$$

$$n_p = \frac{0^\circ}{360^\circ} = 0 [-]$$

Kde:  $\beta$ - úhel mezi pracovním a opěrným ramenem ve volném stavu [°].

- 2) Celkový počet činných závitů zkrutné pružiny  $n_b$ :

$$n_b = n + n_p [-] \quad 2.2$$

$$n_b = 18 + 0 = 18,0 [-]$$

Kde:  $n$ - počet celých činných závitů zkrutné pružiny [–],  
 $n_p$ - neceločíselná část počtu činných závitů [–].

Dle [15] pro celkový počet činných závitů zkrutné pružiny  $n_b = 18,0$  [–] platí mezní úchylka úhlu ramen ve volném stavu  $\theta_u = \pm 15$  [°]. Úhel  $\alpha$ , který je úhlem ramen ve stavu plně zatíženém je v tomto případě roven  $\alpha = 90$  [°]. Pro vybraný materiál drátu pružiny je modul pružnosti v tahu  $E = 180000$  [MPa].

- 3) Vnější průměr pružiny  $D$ :

$$D = 2 \cdot d + d_i [\text{mm}] \quad 2.3$$

$$D = 2 \cdot 1,5 + 6 = 9 [\text{mm}]$$

Kde:  $d$ - průměr drátu pružiny [mm],  
 $d_i$ - vnitřní průměr pružiny [mm].



- 4) Střední průměr pružiny  $\emptyset D_s$ :

$$D_s = D - d \text{ [mm]} \quad 2.4$$

$$D_s = 9 - 1,5 = 7,5 \text{ [mm]}$$

Kde:  $d$ - průměr drátu pružiny [mm],  
 $D$ - vnější průměr pružiny [mm].

- 5) Poměr vinutí vyjadřující míru zakřivení drátu  $C$ :

$$C = \frac{D}{d} [-] \quad 2.5$$

$$C = \frac{9}{1,5} = 6 [-]$$

- 6) Součinitel zohledňující vliv zakřivení závitů pružiny na velikost normálového napětí drátu  $K$ . Maximální ohybové napětí se nachází na vnitřní straně drátu, pro kterou je součinitel s indexem  $i$ , potom  $K_i$ :

$$K_i = \frac{4 \cdot C^2 - C - 1}{4 \cdot C \cdot (C - 1)} [-] \quad 2.6$$

$$K_i = \frac{4 \cdot 6^2 - 6 - 1}{4 \cdot 6 \cdot (6 - 1)} = 1,141 [-]$$

Kde:  $C$ - poměr vinutí [-].

- 7) Mez pevnosti v tahu  $R_m$  pro třídu drátu SM je stanovena dle [15] vztahem:

$$R_m = 1980 - 740 \cdot \log_{10}(d) \text{ [MPa]} \quad 2.7$$

$$R_m = 1980 - 740 \cdot \log_{10}(1,5) = 1849,7 \text{ [MPa]}$$

Kde:  $d$ - průměr drátu pružiny [mm].

- 8) Mez kluzu v tahu  $R_e$  pro austenitickou korozivzdornou ocel je stanovena dle [15] vztahem:

$$R_e = 0,61 \cdot R_m \text{ [MPa]} \quad 2.8$$

$$R_e = 0,61 \cdot 1849,7 = 1128,3 \text{ [MPa]}$$

Kde:  $R_m$ - mez pevnosti v tahu [MPa].

- 9) Maximální ohybový moment, který je schopna pružina vyvinout, aniž by nastal mezní stav pružnosti.  $M_{omax}$  je stanoven dle [15] vztahem:

$$M_{omax} = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot R_e}{32 \cdot K_i} [N \cdot mm] \quad 2.9$$

$$M_{omax} = \frac{\pi \cdot 1,5^3 \cdot 1128,3}{32 \cdot 1,141} = 327,5 [N \cdot mm]$$

Kde:  $d$ - průměr drátu pružiny [mm],  
 $R_e$ - mez kluzu v tahu [MPa],  
 $K_i$  - součinitel zohledňující vliv zakřivení závitů pružiny kluzu v tahu [–].

- 10) Úhlová výchylka pracovního ramena daná zkroucením závitů pružiny  $\theta'_c$  je stanovena dle [15] vztahem:

$$\theta'_c = \frac{10,8 \cdot M_{omax} \cdot D \cdot n_b}{d^4 \cdot E} [-] \quad 2.10$$

$$\theta'_c = \frac{10,8 \cdot 327,5 \cdot 9 \cdot 18}{1,5^4 \cdot 180000} = 0,631 [-]$$

$$\theta'_c = 0,631 \cdot 2 \cdot \pi = 3,958 [rad] = 226,3 [^\circ]$$

Kde:  $M_{omax}$ - maximální ohybový moment [N · mm],  
 $D$ - vnější průměr pružiny [mm],  
 $n_b$ - celkový počet činných závitů zkrutné pružiny [–],  
 $d$ - průměr drátu pružiny [mm],  
 $E$ - modul pružnosti v tahu drátu pružiny [MPa].

- 11) Redukovaný počet činných závitů zkrutné pružiny  $n'_a$  dle [15]:

$$n'_a = n_b + \frac{L_1 + L_2}{3 \cdot \pi \cdot D} [-] \quad 2.11$$

$$n'_a = 18 + \frac{32 + 15}{3 \cdot \pi \cdot 9} = 18,55 [-]$$

Kde:  $L_1$ - délka pracovního ramene [mm],  
 $L_2$ - délka opěrného ramene [mm],  
 $n_b$ - celkový počet činných závitů zkrutné pružiny [–],  
 $D$ - vnější průměr pružiny [mm].

12) Momentová tuhost pružiny  $k'$  je stanovena dle [15] vztahem:

$$k' = \frac{E \cdot d^4}{10,8 \cdot D \cdot n'_a} [N \cdot mm^{-1}] \quad 2.12$$

$$k' = \frac{180000 \cdot 1,5^4}{10,8 \cdot 9 \cdot 18,55} = 505,3 [N \cdot mm^{-1}]$$

$$k' = \frac{505,3}{360^\circ} = 1,53 [N \cdot mm^{-1} \cdot ^\circ^{-1}]$$

Kde:  $D$ - vnější průměr pružiny [mm],  
 $n'_a$ - redukovaný počet činných závitů zkrutné pružiny [–],  
 $d$ - průměr drátu pružiny [mm],  
 $E$ - modul pružnosti v tahu drátu pružiny [MPa].

13) Celková úhlová výchylka pracovního ramena  $\theta'_t$  je stanovena dle [15] vztahem:

$$\theta'_t = \frac{M_{omax}}{k'} [-] \quad 2.13$$

$$\theta'_t = \frac{327,5}{505,3} = 0,648 [-]$$

$$\theta'_t = 0,648 \cdot 2 \cdot \pi = 4,071 [rad] = 233,3 [^\circ]$$

Kde:  $M_{omax}$  - maximální ohybový moment [ $N \cdot mm$ ],  
 $k'$  - momentová tuhost pružiny [ $N \cdot mm^{-1}$ ].

14) Střední průměr pružiny  $D'_s$  zatížené maximálním ohybovým momentem, který je pružina schopna vyvinout, aniž by nastal mezní stav pružnosti, se stanoví dle [15] vztahem:

$$D'_s = \frac{n_b \cdot D}{n_b + \theta'_c} [mm] \quad 2.14$$

$$D'_s = \frac{18 \cdot 9}{18 + 0,63} = 8,7 [mm]$$

Kde:  $\theta'_c$ - úhlová výchylka pracovního ramena [–],  
 $n_b$ - celkový počet činných závitů zkrutné pružiny [–],  
 $D$ - vnější průměr pružiny [mm].

15) Vnitřní průměr pružiny zatížené max. momentem  $\phi D'_i$  dle [15] vztahem:

$$D'_i = D'_s - d [mm] \quad 2.15$$

$$D'_i = 8,7 - 1,5 = 7,2 [mm]$$

Kde:  $D'_s$ - Střední průměr pružiny [mm],  
 $d$ - průměr drátu pružiny [mm].

16) Vůle  $\Delta$  mezi vnitřním průměrem zatížené pružiny a vodícím trnem je dle [15] dána:

$$\Delta = D'_i - D_p \text{ [mm]} \quad 2.16$$

$$\Delta = 7,2 - 4 = 3,2 \text{ [mm]}$$

Kde:  $D'_i$ - vnitřní průměr pružiny [mm],  
 $D_p$  - průměr vodícího trnu pružiny [mm].

Vodícím trnem pružiny je v tomto případě mosazná trubka o vnějším průměru  $\varnothing D_p = 4 \text{ [mm]}$ .

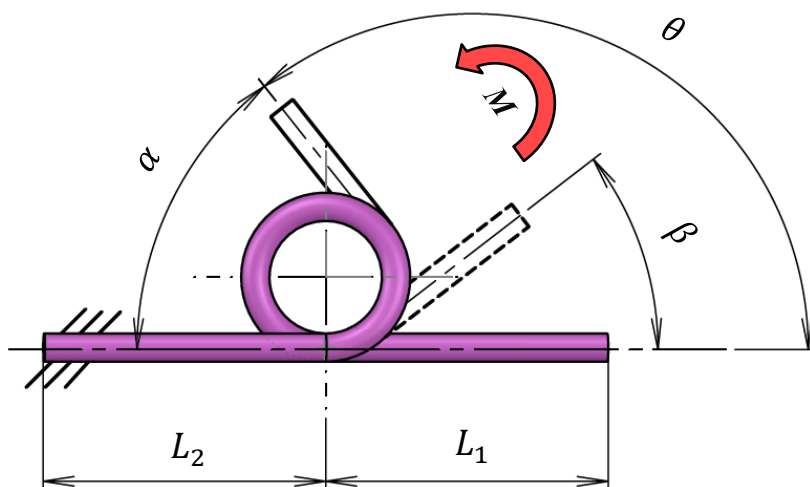
17) Zatížení pružiny momentem  $M$  je dle [15] dáno vztahem:

$$M = \frac{\theta \cdot d^4 \cdot E}{64 \cdot D \cdot n_b} \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad 2.17$$

$$M = \frac{\pi \cdot 1,5^4 \cdot 180000}{2 \cdot 64 \cdot 9 \cdot 18} = 165,7 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

Kde:  $\theta$ - úhlová výchylka pracovního ramene [rad],  
 $D$ - vnější průměr pružiny [mm],  
 $n_b$ - celkový počet činných závitů zkrutné pružiny [–],  
 $d$ - průměr drátu pružiny [mm],  
 $E$ - modul pružnosti v tahu drátu pružiny [MPa].

Úhlová výchylka pracovního ramene je v tomto případě  $\theta = 90 [^\circ] = \pi/2$ , úhel mezi pracovním a opěrným ramenem ve volném stavu  $\beta = 0 [^\circ]$ . Úhel  $\alpha$  je úhlem mezi pracovním a opěrným ramenem ve stavu plně zatíženém. V tomto případě  $\alpha = 90 [^\circ]$ .



Obr. 57 Obecné schéma zkrutné pružiny

Na Obr. 57 je zobrazeno schéma zkrutné pružiny. Barevně je vyznačena skutečná poloha ramen v nezátíženém stavu. Aby bylo možné vyznačit úhel  $\beta$  je čárkovanou čarou vyznačena fiktivní poloha pracovního ramene ve volném stavu. Plnou obrysovou čarou je pak vyznačena poloha pracovního ramene v konečné poloze. Z důvodu názornosti vynesení jednotlivých úhlů bylo schéma nakresleno pro obecnou polohu, kdy žádný z úhlů není roven  $\pi/2$ .

18) Ohybové napětí  $\sigma_o$  v drátu pružiny je dle [15] dáno vztahem:

$$\sigma_o = \frac{32 \cdot M \cdot K_i}{\pi \cdot d^3} \text{ [MPa]} \quad 2.18$$

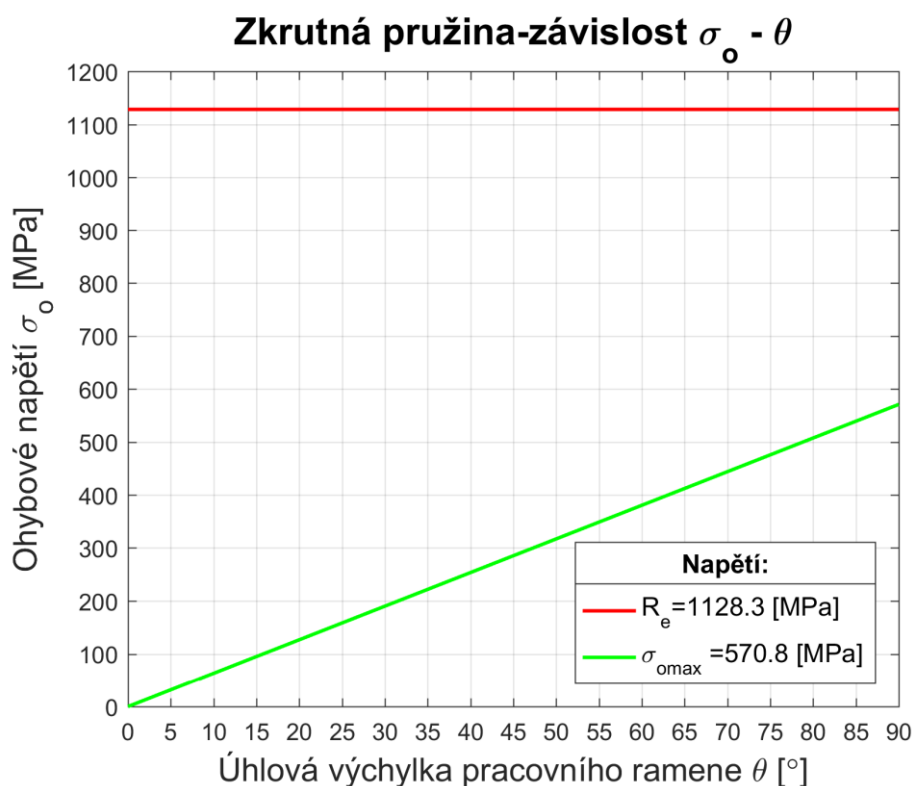
$$\sigma_o = \frac{32 \cdot 165,7 \cdot 1,141}{\pi \cdot 1,5^3} = 570,8 \text{ [MPa]}$$

Kde:  $M$  – zatěžovací moment pružiny [ $N \cdot mm$ ],  
 $K_i$  – součinitel zohledňující vliv zakřivení závitů pružiny [–],  
 $d$  – průměr drátu pružiny [ $mm$ ].

Výsledné ohybové napětí musí splňovat podmínku:

$\sigma_o \leq \sigma_{oD} = R_e \Rightarrow 570,8 \text{ [MPa]} \leq 1128,3 \text{ [MPa]} \Rightarrow$  pružina **vyhovuje** z hlediska statického zatížení ohybovým momentem.

Na Graf. 2 je zobrazen průběh ohybového napětí  $\sigma_o$  v závislosti na úhlové výchylce pracovního ramene  $\theta$ .



Graf. 2 Závislost ohybového napětí  $\sigma_o$  na úhlové výchylce pracovního ramene  $\theta$

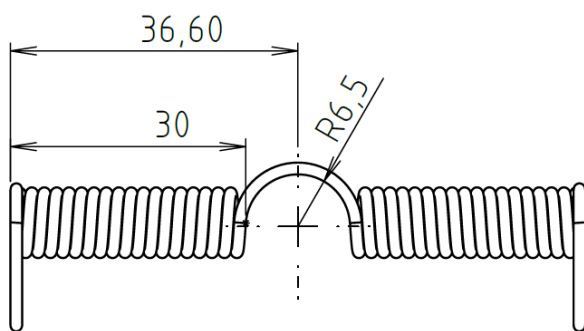
19) Délka těla pružiny  $L_s$  je dle [15] dáno vztahem:

$$L_s = 1,05 \cdot d \cdot (n + 1) \text{ [mm]} \quad 2.19$$

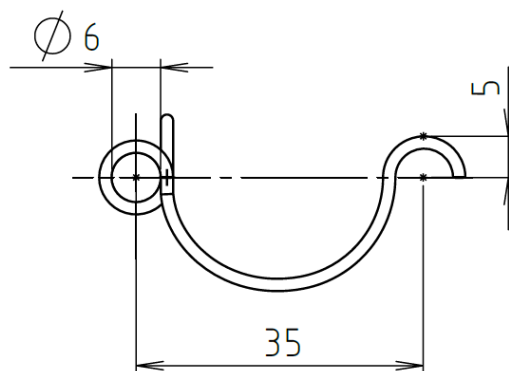
$$L_s = 1,05 \cdot 1,5 \cdot (18 + 1) = 30,0 \text{ [mm]}$$

Kde:  $n$ - počet celých činných závitů zkrutné pružiny [–],  
 $\varnothing d$ - průměr drátu pružiny [mm].

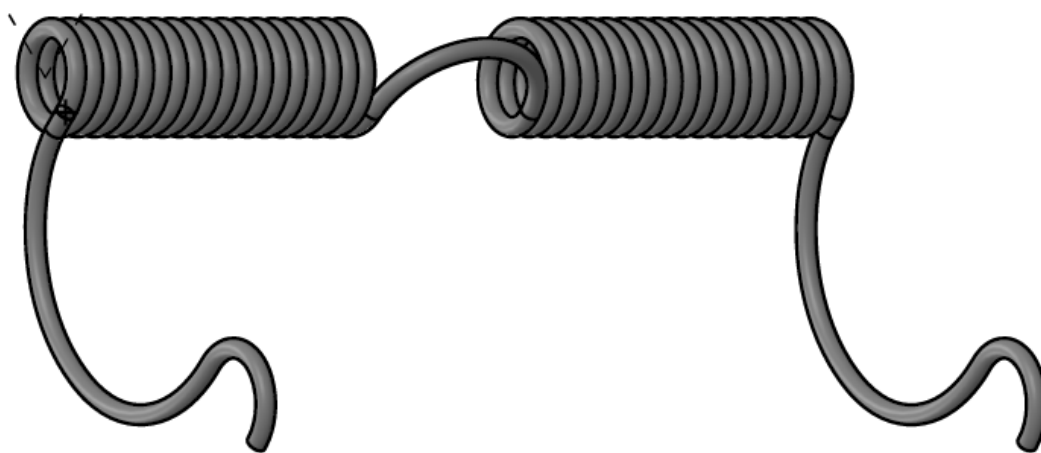
Zkrutné pružiny jsou vyráběny buď s přiléhajícími závitů (dominantně) staticky zatěžované nebo s vůlí mezi závitů pro (dominantně) dynamicky zatěžované. [15], [34]. Na Obr. 58, Obr. 59, Obr. 60 níže je zobrazena pružina v jednotlivých pohledech.



Obr. 58 Zkrutná pružina-pohled přední



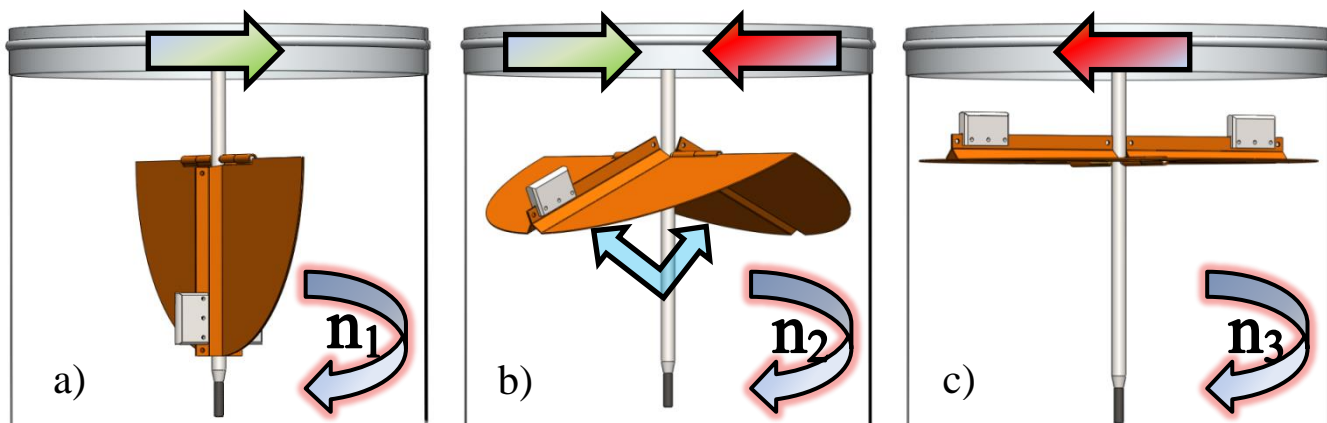
Obr. 59 Zkrutná pružina-pohled pravý



Obr. 60 Model zkrutné pružiny

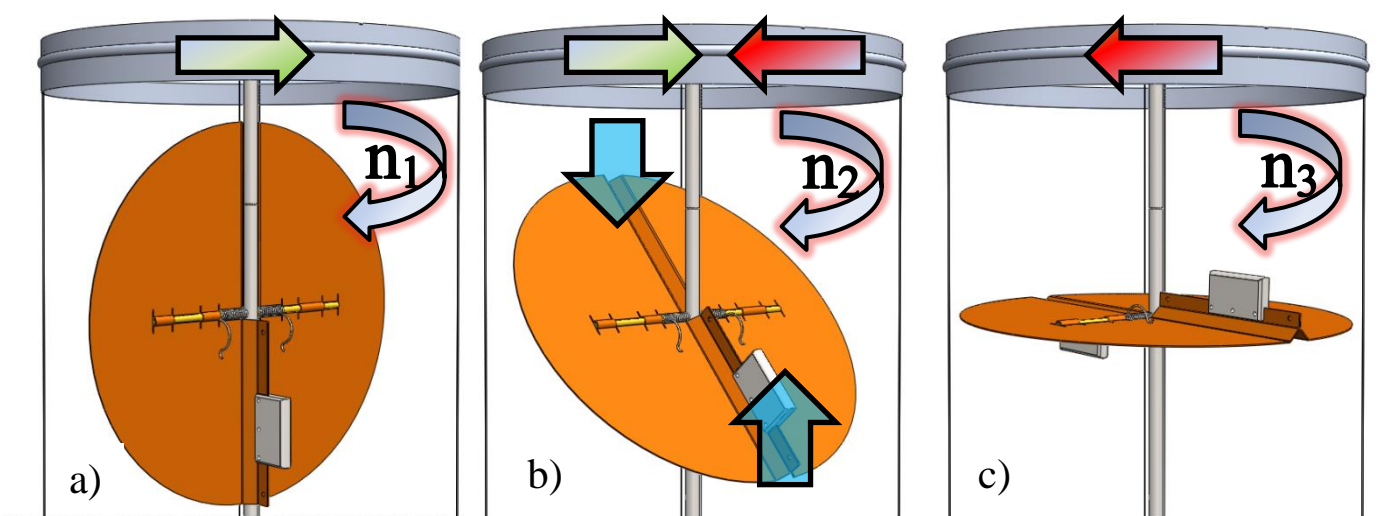
### 2.1.4 SESTAVA EDMONDS HURRICANE

Složením jednotlivých dílů, které již byly popsány v předcházejících kapitolách vznikl celek-sestava. Na obrazových snímcích je jednak zobrazena funkce otevírání/zavírání regulační klapky ve vybraných polohách (otevřeno, mezi-poloha, zavřeno). Dále pak dva detaily na vnitřní část turbíny a uložení hřídele a nakonec snímky zobrazující celkový pohled na sestavu turbíny Edmonds Hurricane s čtvrt-klapkou a půl-klapkou.



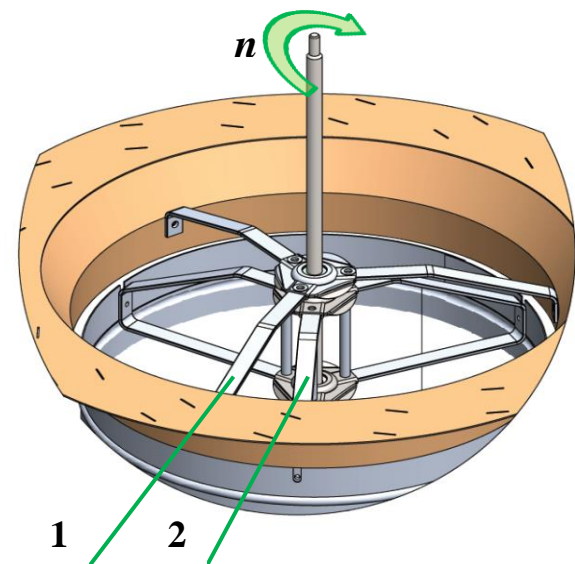
Obr. 61 Poloha čtvrt-klapky. a) otevřeno, b) obecná mezi-poloha, c) uzavřeno

V průběhu pracovní funkce klapky, projde klapka třemi hlavními polohami, tak jak ukazuje Obr. 61. V poloze „a)“ dle Obr. 61 je klapka ve stavu „otevřeno“ a hřídel, na kterém je klapka uložena se otáčí otáčkami  $n_1$  v naznačeném smyslu otáčení tmavě modrou šipkou. Zelená šipka znázorňuje cyklus uzavírání klapky a červená šipka cyklus otevírání klapky v Obr. 61. V poloze „b)“ je klapka v tzv. mezi-poloze. Tedy nachází se v poloze mezi oběma krajními stavy klapky a to především díky otáčkám hřídele  $n_2$ , přičemž platí  $n_2 > n_1$ . V poloze „c)“ je klapka v poloze „uzavřeno“ a zabraňuje tak průchodu  $Q_V$  vzduchu při otáčkách hřídele  $n_3$ , pro které platí  $n_3 > n_2 > n_1$ . Klapka se vůči ose hřídele zavírá symetricky ve směru světle modré šipky v Obr. 61.

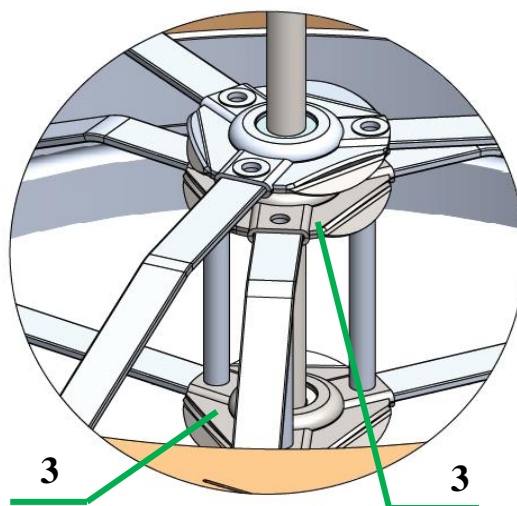


Obr. 62 Poloha půl-klapky. a) otevřeno, b) obecná mezi-poloha, c) uzavřeno

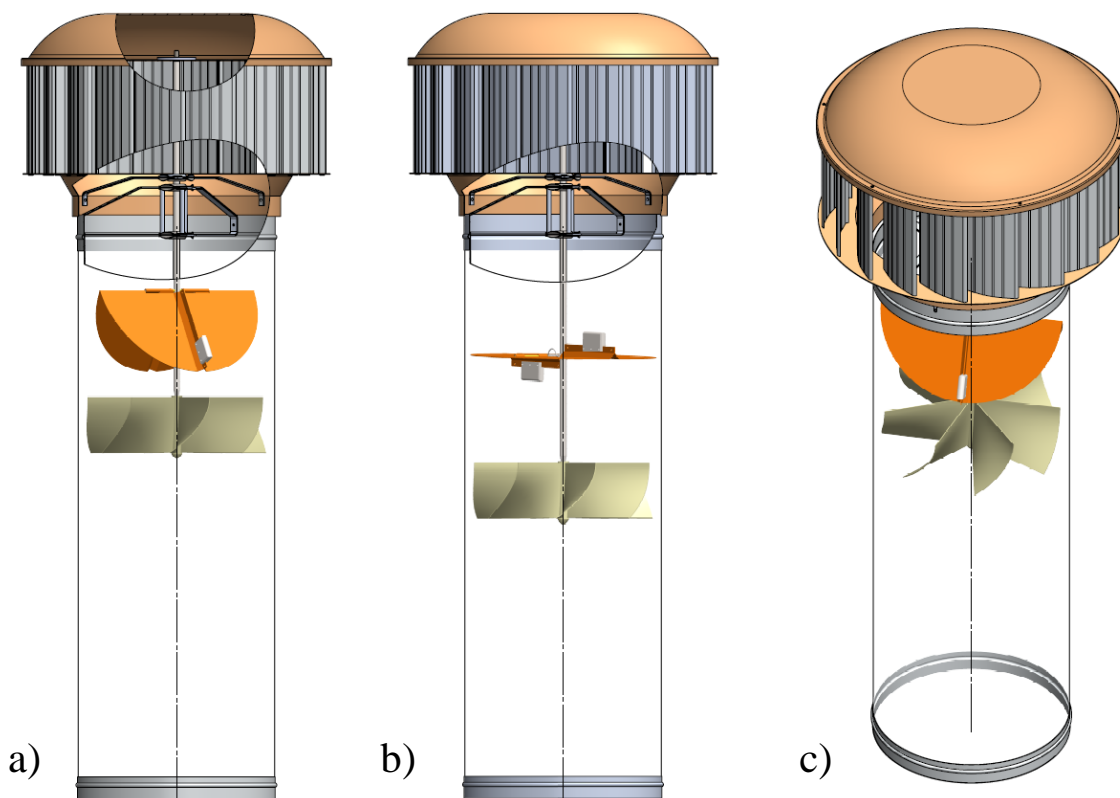
U půl-klapky je tomu na Obr. 62 obdobně, přičemž značení je stejné jako na předešlém obrázku. Klapka se vůči ose hřídele zavírá překlopením, ve směru světle modré šipky viz Obr. 62. Níže na Obr. 64 je detail sestavy zachycující vnitřní část turbíny (pohled na otočná a neotočná ramena). Další detail na Obr. 63 zobrazuje pohled na uložení hřídele turbíny. Na Obr. 65 je zobrazena celková sestava turbíny Edmonds Hurricane.



Obr. 64 Detail-vnitřní část Edmonds Hurricane;  
1 – otočné rameno; 2 – statické rameno



Obr. 63 Detail-uložení hřídele Edmonds Hurricane; 3 – ložisko



Obr. 65 Sestava turbíny Edmonds Hurricane. a) přední pohled s čtvrt-klapkou. b) přední pohled s půl-klapkou. c) izometrický pohled s čtvrt-klapkou.



## 2.2 MODEL VYTOZ-EKO ZLT

Model *ZLT* ventilační turbíny firmy *VYTOZ-EKO* je dalším ze zpracovaných 3D modelů. Podrobnosti o tomto typu byly již uvedeny v podkapitole-1.7.3, proto zde již nejsou dále zmíněny. V následujících podkapitolách jsou blíže popsány funkce a parametry jak samotných dílů, tak sestav. Některé ze součástí jsou identické se součástmi použitými na modelu ventilační turbíny *Edmonds Hurricane* a proto nejsou v následujících podkapitolách opětovně popisovány.

### Dílčí součásti modelu VYTOZ-EKO ZLT:

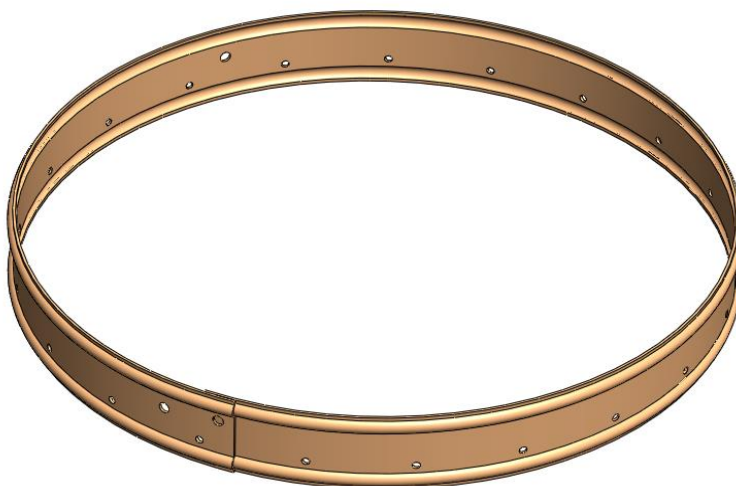
- a) Potrubí
- b) Dolní a horní obruč
- c) Límec
- d) Lopatka
- e) Hřídel
- f) Otočné a statické rameno
- g) Ložiskový domeček a ložiska
- h) Střecha
- i) Mechanická klapka
- j) Ventilátor

### 2.2.1 DÍLY SESTAVY

Díly jsou seřazeny dle pořadí, ve kterém byly postupně vytvořeny.

#### 2.2.1.1 LÍMEC

Součást *Límec* je ekvivalentem součásti *rotor* (turbíny *Edmonds Hurricane*) viz kapitola-2.1.1.3 a plní shodnou funkci. Avšak zde jsou *lopatky* připojeny nýtovým<sup>18</sup> spojem k *límci* po jeho obvodu. *Otočná ramena* jsou jako v minulém případě uchycena šroubovým spojem po obvodu límce. Límec je z hliníkového plechu o tloušťce  $t_s = 1 \text{ [mm]}$ , který je zkružen.



Obr. 66 Model límec – VYTOZ-EKO ZLT

<sup>18</sup> Nýtový spoj patří k nerozebíratelným spojům, protože jej nelze bez porušení některé z jeho části uvolnit. Rozeznáváme tzv. *přímé* a *nepřímé* nýtování, které je blíže popsáno v [8]. Nýtové spoje se dělí podle účelu použití na *pevné*, *pevné nepropustné*, *nepropustné* a *stehové*. [8]

Z hlediska modelování je postup obdobný jako při tvorbě *dolní* nebo *horní obruče* (charakter *spirály*) s tím rozdílem, že po obvodu límce jsou vedeny dva *lemy* (prolisy) na obou okrajích a tak je vhodné použít prvek-**Tažení po křivce**, který vede daný profil (*skicu profilu*) po příslušné trajektorii (*skica křivky*).

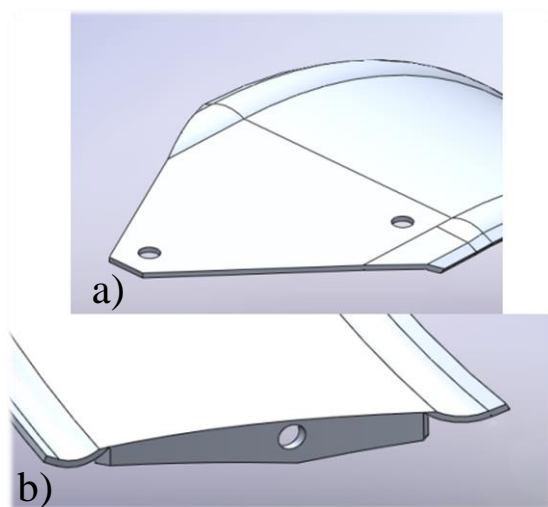
Následně se po obvodu límce vytvoří otvor pro uchycení otočných ramen prvkem-**Odebrat vysunutím** a prvkem-**Kruhové pole** se nastaví *počet instancí* (otvorů), vytvořených po tomto obvodu. Výsledek této operace je zobrazen na Obr. 66 výše.

### 2.2.1.2 LOPATKA

*Lopatka* turbíny VYTOZ-EKO je vyrobena z hliníkového plechu o tloušťce  $t_s = 1$  [mm]. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.2.1.1 *lopatka* je uchycena na svém spodním okraji k součásti *límeč*. Na horním konci lopatky je vytvořena vodorovná plocha pro spojení lopatky se *střechou* turbíny nýtovým spojem.

Z hlediska modelování se jedná součást složitější, jak z hlediska jejího křivého tvaru, tak z hlediska počtu operací-prvků nutných pro její vytvoření. U součástí podobného tvaru stojí vždy před CAD-konstruktorem rozhodnutí, zda upřednostní *objemové* nebo *plošné* modelování ať pracuje v jakémkoliv CAD softwaru, který obě výše zmíněné možnosti umožňuje. V tomto případě se autor rozhodl upřednostnit *plošné* modelování. Tedy vytváření ploch s *nulovou tloušťkou*, kterým je na konci modelování přiřazena tloušťka  $t_s$ . Pro složitost tvaru, zde není možné stručně popsat podrobný postup, proto jsou dále uvedeny pouze vybrané kroky.

V prvním kroku vzhledem k tomu, že je zde vhodné použít prvek-**Tažení po křivce**, je důležité vytvořit dvě *skici*. A to *skicu profilu*, kterou povedeme po příslušné trajektorii, *skice křivky*. Následně se tažený povrch ořízne prvkem-**Oříznout povrch** do požadovaného tvaru, po kterém dále dojde k několika úpravám, při nichž se tento prvek opakovaně použije. Potom se založí prvek-**Rovina** na horní vodorovné ploše lopatky, kvůli vytvoření otvorů prvkem-**Odebrat vysunutím** pro uchycení *lopatky* ke *střeše* turbíny. Po několika kosmetických úpravách je vhodné použít prvek-**Přidat tloušťku** a vytvořit tak *objemovou součást*. Nyní je nutné vytvořit *vysunutí plošky*, kterou bude veden nýt spojující spodní okraj lopatky a *límeč* turbíny. K tomu je nutné vytvořit *3D skicu* příslušného tvaru, která je prvkem-**Přidat vysunutím** vysunuta *vertikálním* směrem dolů. Na vzniklou plochu lze opět aplikovat prvek-**Odebrat vysunutím** a vytvořit tak *otvor* pro nýt.



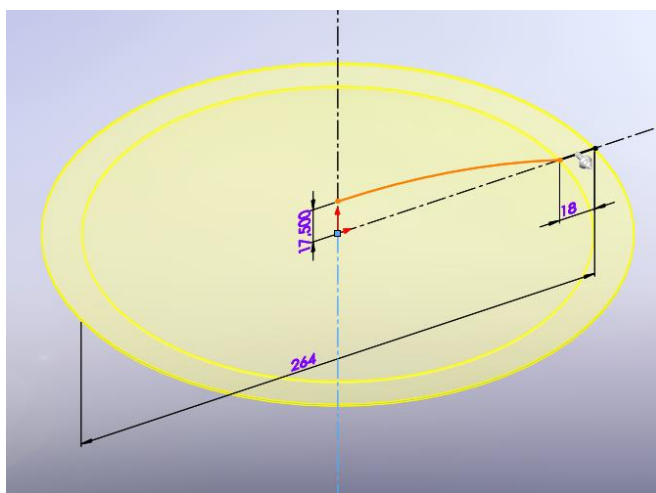
Obr. 68 Konce lopatky model VYTOZ-EKO ZLT. a) horní konec; b) spodní konec



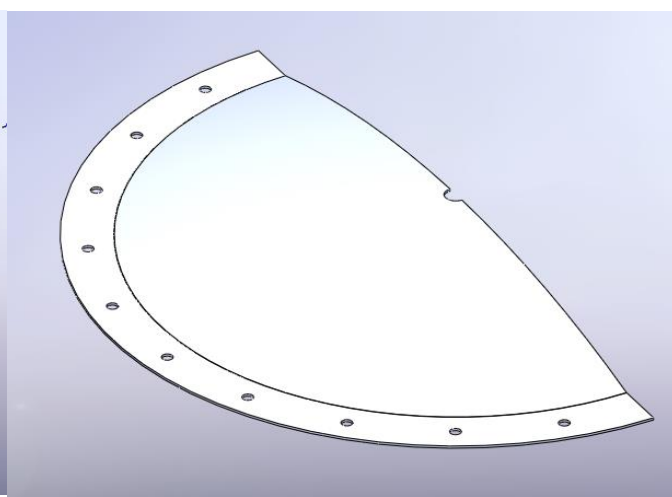
Obr. 67 Render lopatka VYTOZ-EKO ZLT

### 2.2.1.3 STŘECHA

*Střecha* tvoří horní část rotační hlavice. Nad jejím pláštěm o tloušťce stěny  $t_s = 1$  [mm] je umístěno *spojení hřídele* s uzavřenou maticí o velikosti závitu M8. *Střecha* je připojena k *lopatkám*, jak bylo uvedeno v 2.2.1.2 pomocí nýtového spoje po jejím obvodu. Z hlediska modelování se jedná o jednoduchou součást, kde je vhodné použití *pravé roviny* pro *skicu profilu* a následné použití prvku-**Přidání rotací** s vybranou volbou jako *tenkostěnný* kolem centrální osy.



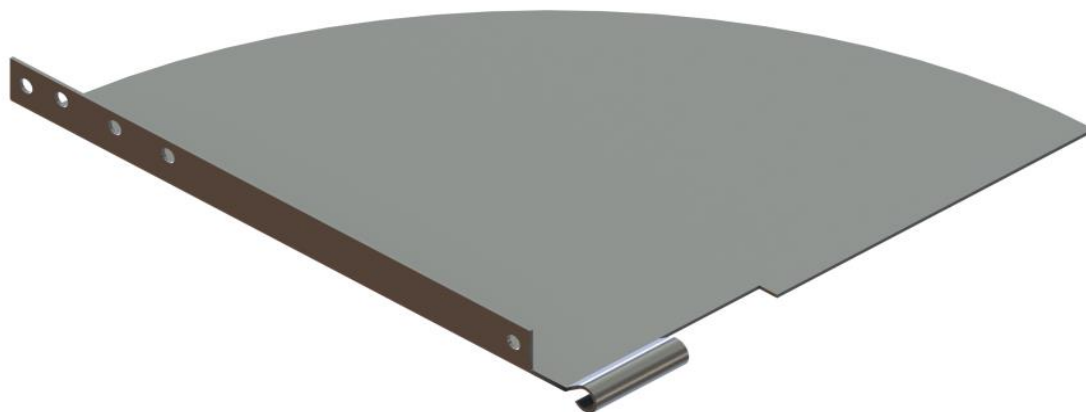
Obr. 70 Model střecha VYTOZ-EKO ZLT – aplikace prvku přidání rotací



Obr. 69 Řez modelem střecha – VYTOZ-EKO ZLT

### 2.2.2 MECHANICKÁ REGULACE „ČTVRT-KLAPKOU“

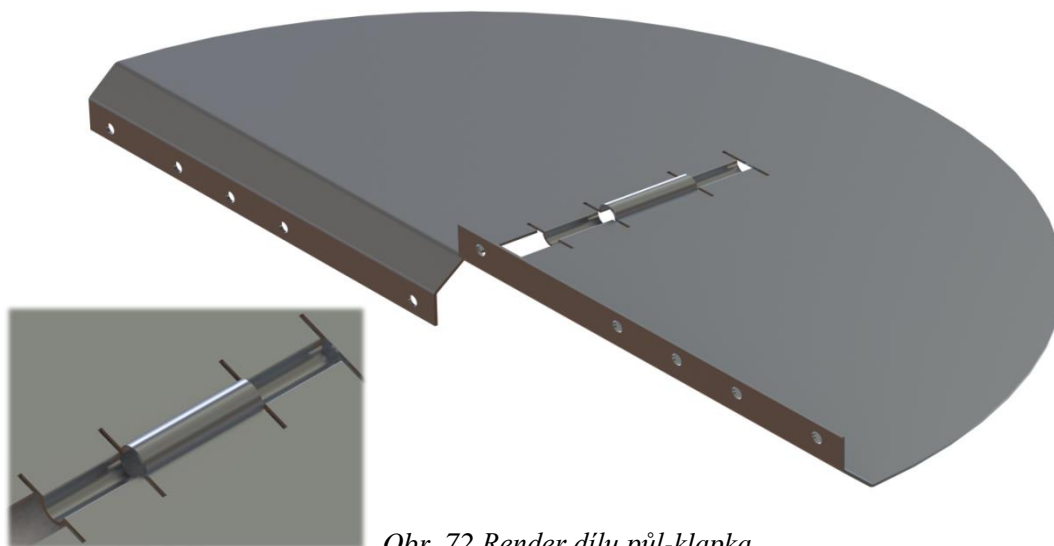
V modelu turbíny VYTOZ-EKO ZLT je použita identická regulační mechanická čtvrt-klapka jako tomu bylo v kapitole-2.1.2 u modelu *Edmonds Hurricane*. Způsob zavírání klapky, který byl zobrazen v kapitole-2.1.4 je opět shodný a proto zde již nebudou tyto skutečnosti opětovně popsány. Namísto toho byl vykreslen render čtvrt-klapky, který nebyl uveden v kapitole-2.1 a proto je uveden zde.



Obr. 71 Render dílu čtvrt-klapka

### 2.2.3 MECHANICKÁ REGULACE „PŮL-KLAPKOU“

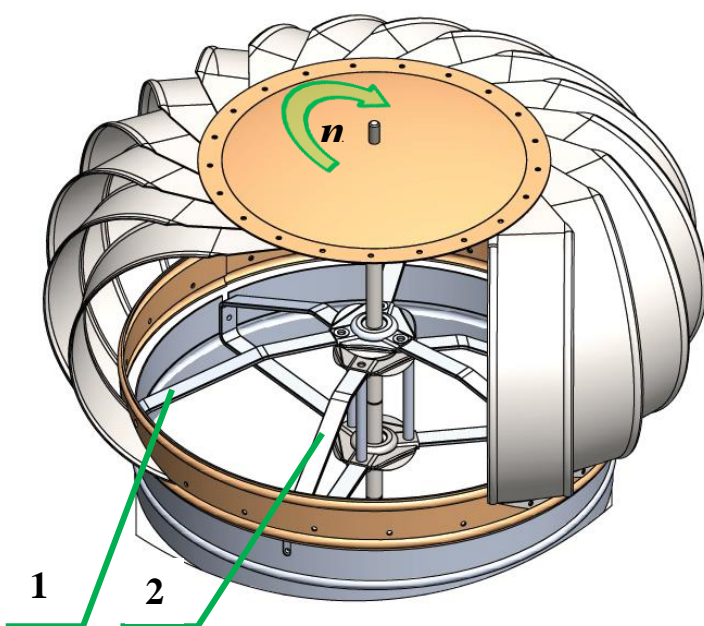
V modelu turbíny *VYTOZ-EKO ZLT* je použita identická regulační mechanická půl-klapka jako tomu bylo v kapitole-2.1.3 u modelu *Edmonds Hurricane*. Způsob zavírání klapky, který byl zobrazen v kapitole-2.1.4 je opět shodný a proto zde již nebudou tyto skutečnosti opětovně popsány. Namísto toho byl vykreslen render půl-klapky, který nebyl uveden v kapitole-2.1 a proto je uveden zde.



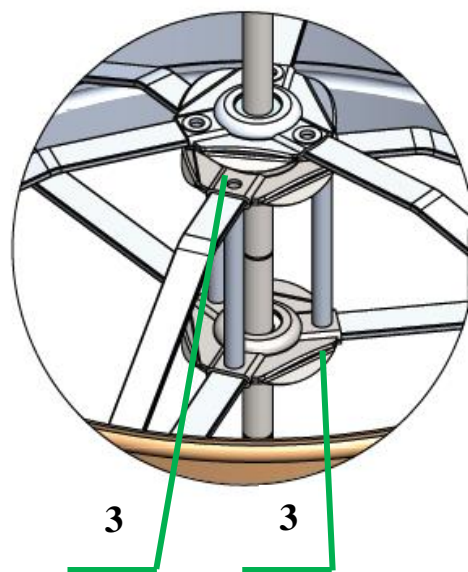
Obr. 72 Render dílu půl-klapka

### 2.2.4 SESTAVA VYTOZ-EKO

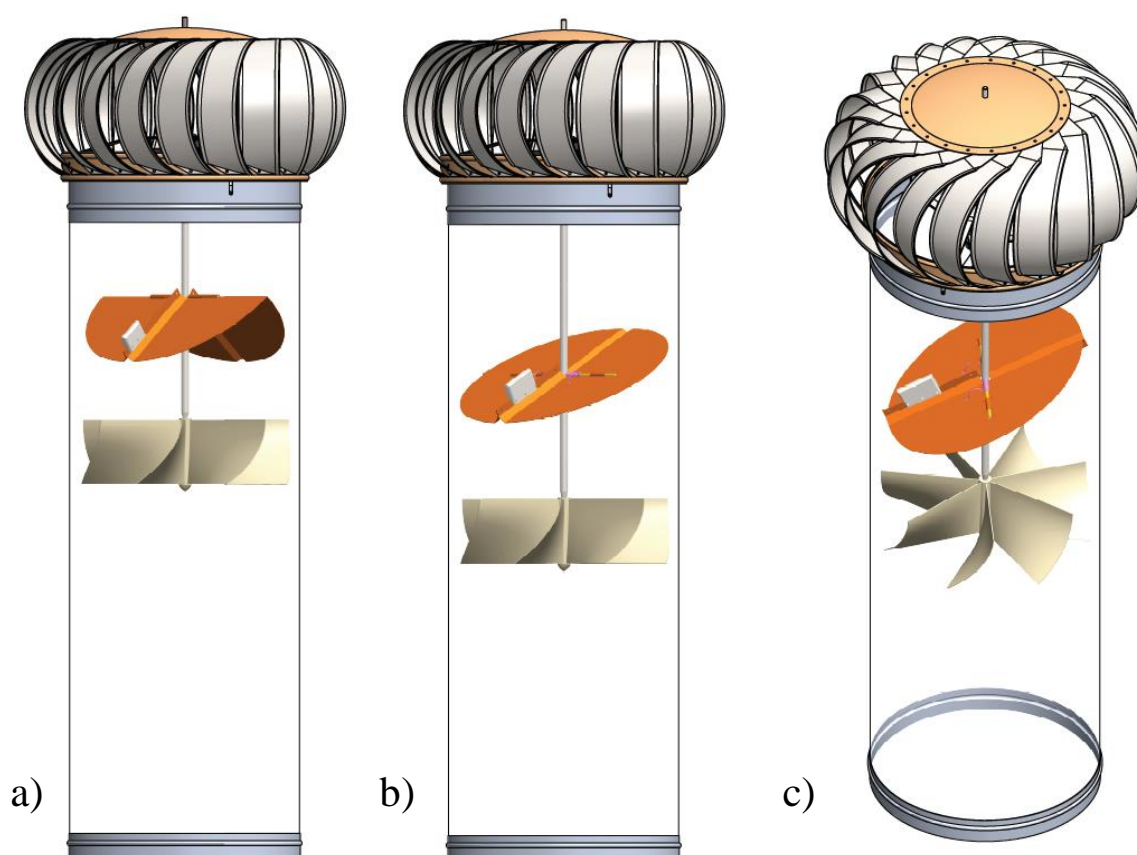
Složením jednotlivých dílů, které již byly popsány v předcházejících kapitolách, vznikl celek-sestava. Na obrazových snímcích jsou jednak zobrazeny dva detaily na vnitřní část turbíny Obr. 73 a uložení hřídele Obr. 74 a nakonec snímky zobrazující celkový pohled na sestavu turbíny *VYTOZ-EKO ZLT* s čtvrt-klapkou a půl-klapkou na Obr. 75.



Obr. 73 Detail-vnitřní část VYTOZ-EKO ZLT; 1 – otočné rameno; 2 – statické rameno



Obr. 74 Detail-vnitřní část VYTOZ-EKO ZLT; 3 – ložisko



Obr. 75 Sestava turbíny VYTOZ-EKO ZLT. a) přední pohled s čtvrt-klapkou. b) přední pohled s půl-klapkou. c) izometrický pohled s půl-klapkou.



### 3 NÁVRH SYSTÉMU VÝPOČTU TVARŮ LOPATEK

Cílem poslední kapitoly je vytvoření systému výpočtu tvarů lopatek axiálního ventilátoru vzhledem k proudění vzduchu. Při použití ventilátoru se mění charakter systému větrání dané stavby ventilační turbínou *z přirozeného* na *hybridní*, viz kapitola-1.3.1. Kapitola 3. lze rozdělit na dvě hlavní části. V první části-3.1 se jednak jedná o teoretický přístup k problému, provedení výpočtu lopatky axiálního ventilátoru a následnou tvorbu 3D modelu. Druhá část kapitoly je zaměřena na softwarovou automatizaci výpočtu.

#### 3.1 NÁVRH AXIÁLNÍHO VENTILÁTORU VENTILAČNÍ TURBÍNY

V této podkapitole je jednak přiblížena teorie axiálních ventilátorů, co do jejich názvosloví, rozdělení a funkce. Dále pak jsou uvedeny parametry a vybrané vztahy pro výpočet axiálního ventilátoru. Protože se v tomto případě jedná o specifickou aplikaci axiálního ventilátoru, jak co do jeho konstrukce (provedení), pohonu (bez asynchronního elektromotoru) a dalších okolností, nelze tak plně aplikovat systém výpočtu axiálního ventilátoru, který je uveden v literatuře [11], [2], [16].

Následně podkapitola-3.1.2 obsahuje vlastní výpočet ze vstupních parametrů dle podkladů vedoucího práce. Výpočet je do jisté míry pouze orientační, protože ke stanovení skutečného proudění vzdušnin a optimálního tvaru lopatek je nutné provést buď sérii reálných experimentálních měření nebo využití CFD<sup>19</sup> simulací např. v softwaru ANSYS-Fluent, YADE. V tomto případě je výpočet proveden využitím výpočtových vztahů dle literatury [11], [2], [16] v matematicko-technickém softwaru MATLAB z něhož jsou data exportována do CAD softwaru Solidworks viz kapitola-3.1.2.

##### 3.1.1 TEORIE AXIÁLNÍCH VENTILÁTORŮ

Ventilátory jsou rotační lopátkové stroje<sup>20</sup>, které jsou určeny ke kontinuální dopravě vzdušnin při malých kompresních poměrech<sup>21</sup>  $k_p$  (u ventilátorů je hodnota  $k_p = 1,01 - 1,1$ ) a větších objemových průtocích  $Q_v$ . Kompresní poměr je poměr absolutního tlaku na výtlaku k absolutnímu tlaku na sání stroje.

Při klasifikaci ventilátorů je základním hlediskem směr průtoku vzdušnin<sup>22</sup> oběžným kolem v jeho meridiánové rovině. Podle toho je možno rozdělit ventilátory *axiální*, *diagonální*, *radiální* a *diametrální*.

Axiální ventilátory mají meridiánovou rychlost vzdušnin na vstupu i výstupu oběžného kola přibližně rovnoběžnou s osou rotace.

K stlačování vzdušnin dochází v důsledku dynamického působení lopatek na vzdušninu. Tento účinek je závislý na relativní rychlosti vzdušnin vůči lopatkám a projevuje se tedy pouze při pohybu oběžného kola. V průtočné části ventilátoru předává oběžné kolo vzdušnině mechanickou energii, jejímž zdrojem je pohon ventilátoru. Přírůstek energie jednotkového objemu vzdušnin, vyjádřený zvýšením celkového tlaku vzdušnin při

<sup>19</sup> CFD (Computational Fluid Dynamics) simulace jsou zaměřeny na tepelné a tokové analýzy při výpočtu dynamiky proudění kapalin a vzdušnin. CFD je zároveň součástí metod CAE (Computer aided engineering) jejíž podstatou je počítačová podpora inženýrských prací, která využívá počítače pro výpočty v průběhu návrhu v různých technických odvětvích. [9], [39]

<sup>20</sup> Lopátkové stroje mají sací a výtlačný prostor navzájem stále spojen. [2]

<sup>21</sup> Stroje s kompresním poměrem  $k_p = 1,5 - 3$  se nazývají dmychadla a stroje s kompresním poměrem  $k_p > 3$  se nazývají kompresory. [2]

<sup>22</sup> Vzdušninou se rozumí plyny, směsi plynů, páry a směsi plynů a par, které dále mohou obsahovat v menších koncentracích kapalné a pevné částice. [2]

průchodu ventilátorem se nazývá celkový tlak ventilátoru  $\Delta p_{cv}$ . Protože ventilátorem dopravovaná vzdušnina je stlačitelná a protože se při průchodu ventilátorem zvyšuje její tlak, mění se měrná hmotnost vzdušiny  $\rho_v$ . Obvykle se změna stavu vzdušiny uvažuje jako *izochorická* ( $k_p < 1,03$ ) nebo *adiabatická*.

Hodnota celkového tlaku ventilátoru  $\Delta p_{cv}$  pro daný ventilátor, charakterizovaný průměrem oběžného kola  $\varnothing D$  a otáčkami  $n$  (frekvencí otáčení) a vzdušninu o dané měrné hmotnosti  $\rho_v$  závisí na průtoku vzdušiny ventilátorem  $Q_v$ . Mechanickou energii předanou vzdušnině lze vyjádřit pomocí vzduchového výkonu  $P_v$  vztahem:

$$P_v = Q_v \cdot \Delta p_{cv} [W] \quad 3.1$$

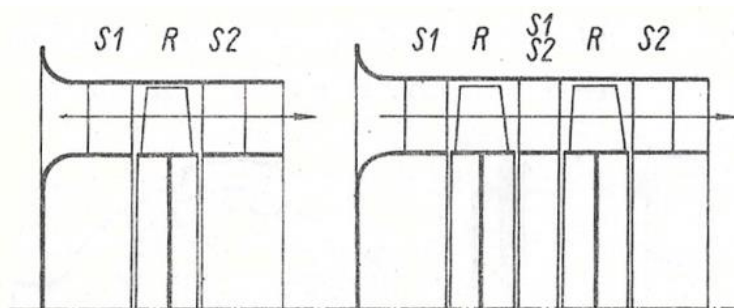
Kde:  $Q_v$  - objemový průtok vzduchu ventilátorem [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ],  
 $\Delta p_{cv}$  - celkový tlak ventilátoru [ $Pa$ ].

Protože s činností ventilátoru jsou spojeny vnitřní ztráty ve ventilátoru, je přírůstek energie jednotkového objemu vzdušiny po průchodu ventilátorem menší než energie přivedená ventilátoru pro dopravu tohoto objemu vzdušiny. Poměr těchto energií se nazývá celková účinnost ventilátoru  $\eta_{cv}$  a charakterizuje aerodynamickou jakost ventilátoru. Účinnost ventilátoru  $\eta_{cv}$  při zanedbatelném vlivu stlačitelnosti se stanoví ze vztahu:

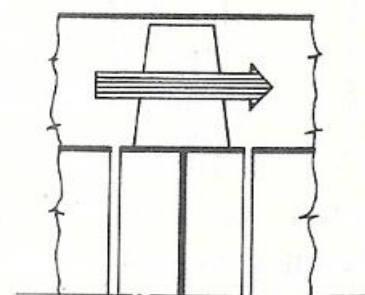
$$\eta_{cv} = \frac{Q_v \cdot \Delta p_{cv}}{P_{mv}} = \frac{P_v}{P_{mv}} [-] \quad 3.2$$

Kde:  $P_{mv}$  - výkon pohonu (motoru) elektromotoru [ $W$ ].

Podle počtu stupňů se ventilátory dělí na jednostupňové a vícestupňové. Úplný stupeň axiálního ventilátoru se skládá z oběžného kola s rotorovými lopatkami (R) a statoru (S1, S2) se statorovými lopatkami.



Obr. 76 Schéma jednostupňového a dvoustupňového axiálního ventilátoru [2]



Obr. 77 Schéma průtoku oběžným kolem axiálního ventilátoru [2]

Podle pracovního přetlaku se dělí ventilátory na nízkotlaké ( $\Delta p_{cv} < 1000 [Pa]$ ), středotlaké  $\Delta p_{cv} = 1000 - 3500 [Pa]$  a vysokotlaké  $\Delta p_{cv} > 3500 [Pa]$ .

Axiální ventilátory se dělí dále na přetlakové, u nichž je statický tlak za oběžným kolem vyšší než před ním a rovnotlaké, u nichž je statický tlak před i za oběžným kolem přibližně stejný. Při výpočtu tvarů lopatek se využívá zákonů podobnosti, kosinové věty, Bernoulliho a Eulerovy turbínové (čerpádlové) rovnice, podobně jako je tomu při výpočtu čerpadel.

V literatuře [11], [2], [16] jsou uvedeny rovnice spolu s jejich odvozením. Protože u axiálního ventilátoru je unášivá rychlost  $u_1 = u_2$  potom se Bernoulliho rovnice upraví do



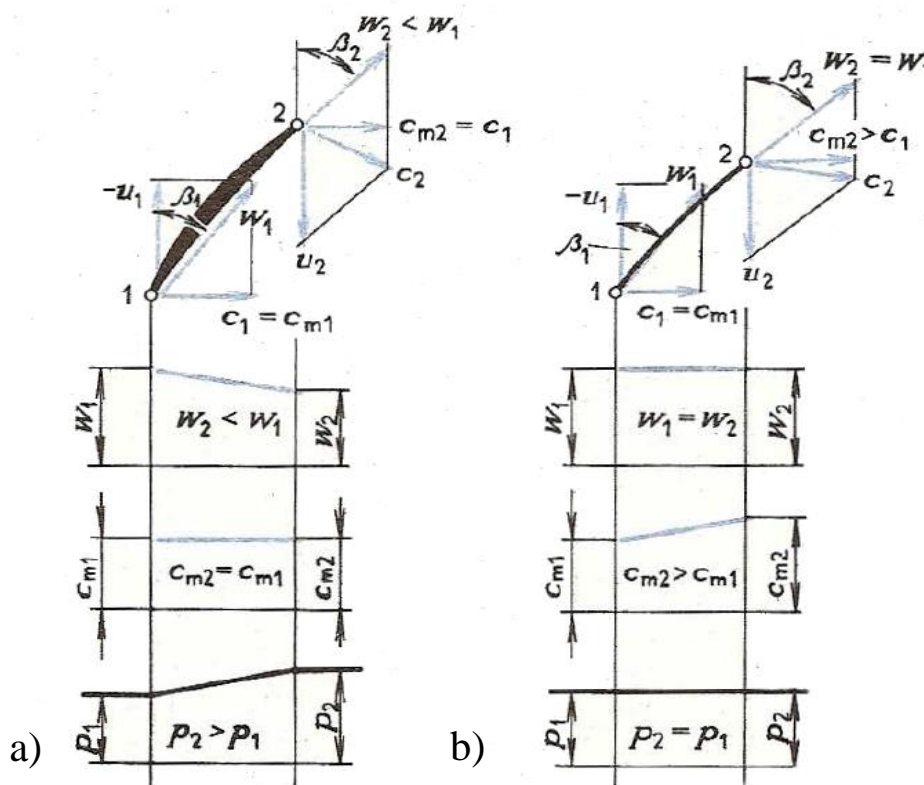
tvary vyjadřující celkový pracovní přetlak. U ventilátorů je oproti čerpadlům mimo jiné rozdíl v tom, že ventilátor charakterizuje jeho celkový tlakový spád a proto není v Bernoulliho rovnici řešen parametr dopravní výšky, jako je tomu u čerpadel.

$$\Delta p_{cv} = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot (w_1^2 - w_2^2) + \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot (c_2^2 - c_1^2) \text{ [Pa]} \quad 3.3$$

Kde:  $\rho_v$  – měrná hmotnost vzdušniny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $w_{1,2}$  – relativní rychlost na vstupu a výstupu [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  
 $c_{1,2}$  – absolutní rychlost na vstupu a výstupu [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Pro získání určitého statického přetlaku se u axiálních ventilátorů používá difuzor, v němž se část složky dynamického přetlaku změní na statickou (část kinetické energie proudícího média se změní v energii tlakovou).

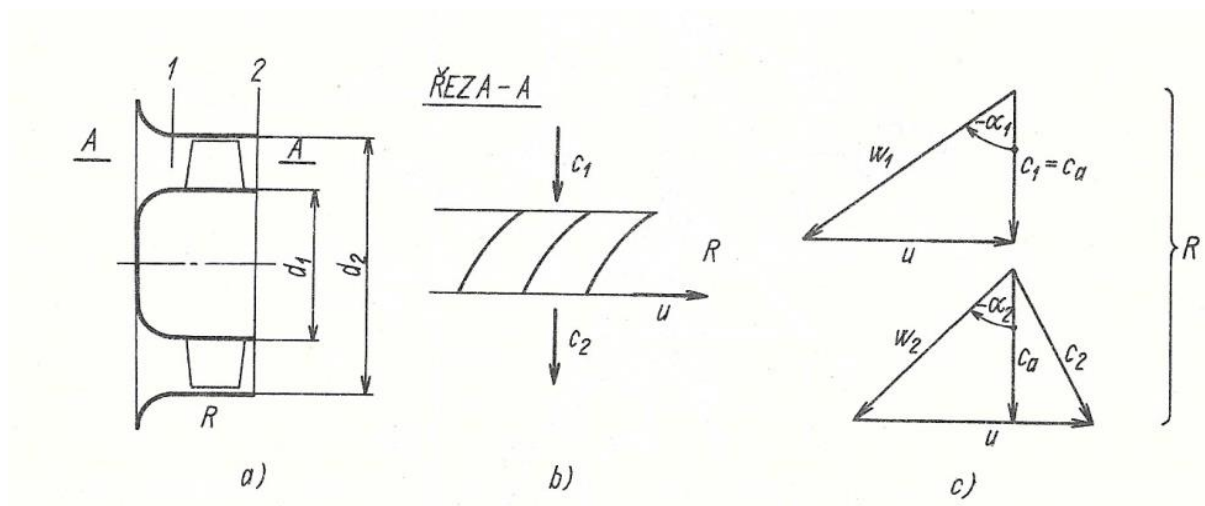
U normálního přetlakového ventilátoru je meridiánová rychlost  $c_m$  konstantní a relativní rychlost  $w_1 > w_2$ . Zvláštním typem jsou rovnotlaké ventilátory, u nichž se meridiánová rychlost zvětšuje a relativní rychlost  $w_1 = w_2$ . Zde se pouze urychluje pracovní médium, ale pracovní přetlak je nulový. S níže uvedeným popisem rychlostí se lze setkat v hydrodynamice při řešení teorie rotujícího kanálu<sup>23</sup>.



Obr. 78 Porovnání rychlostních a tlakových poměrů.  
 a) u přetlakových. b) u rovnotlakých ventilátorů [16]

Při řešení oběžných lopatek se často uvažuje konstantní úhel sklonu lopatek  $\beta$ . U větších strojů s delšími lopatkami se lopatka řeší jako šroubová plocha s proměnlivým úhlem  $\beta$ .

<sup>23</sup> Rychlost označíme jako absolutní  $c$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ], tj. rychlost, kterou by viděl pozorovatel stojící mimo rotující kanál, jako relativní  $w$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ], tj. rychlost, kterou by měl účastník proplouvající kanálem a jako unášivou rychlost  $u$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ], kterou se pohybuje rotující kanál v nehybném prostoru. Vektorový vztah mezi rychlostmi:  $\vec{c} = \vec{w} + \vec{u}$ . [19].



Obr. 79 Axiální ventilátor pouze s oběžným kolem. [2]

a) schématický osový řez. b) válcový řez lopatkovou mříží. c) rychlostní trojúhelníky

U nejjednodušších ventilátorů malých rozměrů se používá provedení bez vstupních a rozváděcích statorových lopatek provedením axiálního ventilátoru je ventilátor pouze s oběžným kolem. Toto provedení se označuje „R“. Proud vstupuje do oběžného kola v axiálním směru bez rotačních složek. V oběžném kole dochází ke zpomalení proudu  $w_1 > w_2$  a proud vzduchu vystupuje z ventilátoru se zkrutem. To znamená, že proud na výstupu z ventilátoru má kromě axiálních i rotační složky rychlosti.

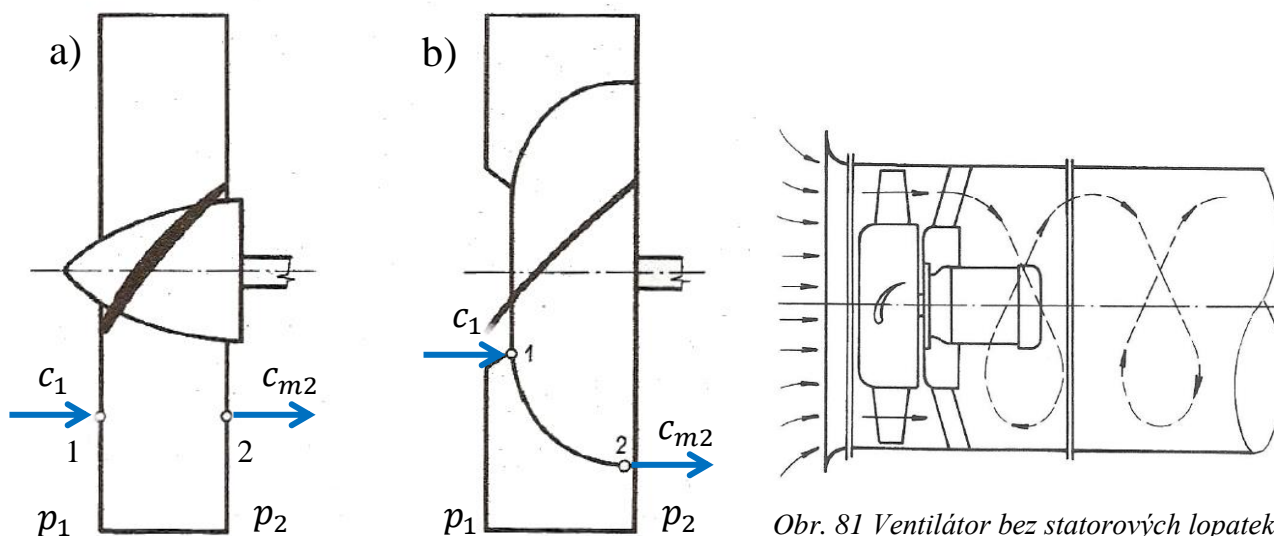
Protože za oběžným kolem nejsou rozváděcí lopatky, je tlak ze složek absolutní rychlosti do obvodového směru  $c_{u2}$  ztrátou. Tato ztráta je dána vztahem:

$$\Delta p_z = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot c_{u2}^2 \text{ [Pa]} \quad 3.4$$

Celkový tlak  $\Delta p_{cv}$ , který může být využit k překonání odporu potrubní sítě je dán vztahem:

$$\Delta p_{cv} = \Delta p_s \text{ [Pa]} \quad 3.5$$

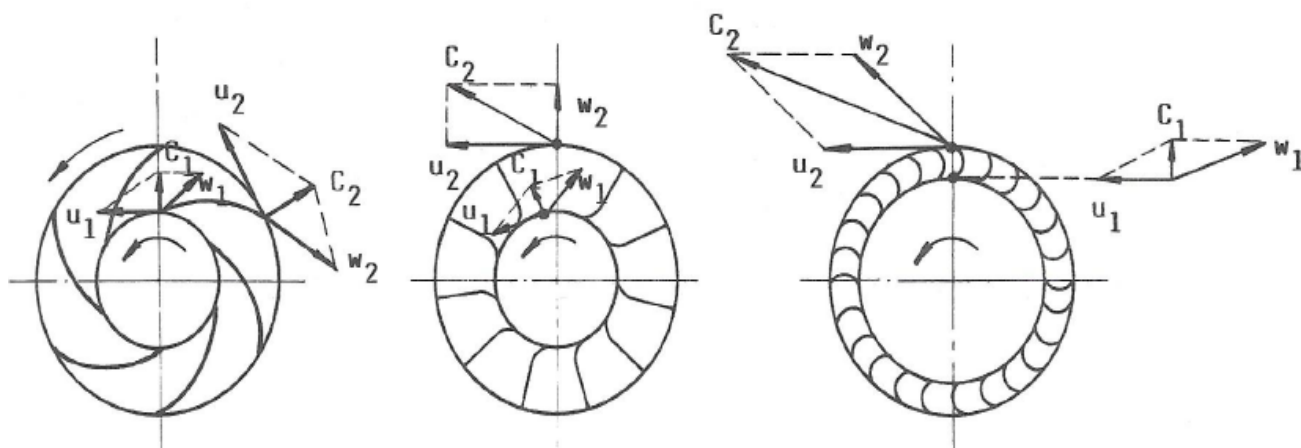
Kde:  $\Delta p_s$  – rozdíl statických tlaků před a za kolem na jeho vnějším průměru [Pa].



Obr. 80 Porovnání rychlostních a tlakových poměrů.

a) u přetlakových. b) rovnotlakých ventilátorů [16]

Obr. 81 Ventilátor bez statorových lopatek [11]



Obr. 82 Oběžná kola ventilátorů. a) s dopředu zahnutými lopatkami. b) s radiálně ukončenými lopatkami. c) s dozadu zahnutými lopatkami [11]

Poměr rychlostí  $c_{u2}/u_2$ , který lze označit jako bezrozměrný parametr  $\tau$  (pro  $\beta_2 < 90^\circ$  je  $\tau < 1$ ) závislý pouze na úhlu  $\alpha_2$ , který je společně s úhlem  $\beta_2$  nejdůležitějším parametrem rychlostních trojúhelníků. Úhel  $\beta_2$  určuje dle hodnoty, které nabývá, o jaký typ ventilátoru se jedná:

- a)  $\beta_2 > 90^\circ$  - ventilátor s dopředu zahnutými lopatkami,
- b)  $\beta_2 = 90^\circ$  - ventilátor s radiálně ukončenými lopatkami,
- c)  $\beta_2 < 90^\circ$  - ventilátor s dozadu zahnutými lopatkami

Axiální ventilátor je přídatným komponentem ventilačních turbín, kde je spolu zdrojem tlaku a dále udílí proudu vzduchu proudícím ve ventilačním potrubí zkrut. Ventilátory, které odsávají dopravovanou látku z určitého prostoru a pracují s podtlakem, se nazývají *exhaustory*. Tato kapitola byla zpracována dle [11], [2] a [16].

### 3.1.2 VÝPOČET AXIÁLNÍHO VENTILÁTORU VENTILAČNÍ TURBÍNY

Vstupními hodnotami pro výpočet, jsou data v Tab. 17, která byla převzata od firmy VYTOZ-EKO. Jedná se o návrh axiálního ventilátoru s dozadu zahnutými lopatkami ( $\beta_2 < 90^\circ$ ) do rovného potrubí o průměru  $\varnothing D_p = 355$  [mm]. Účelem použití axiálního ventilátoru je uskutečnit jednak rychlý náběh do otáček, ale také zvýšit celkovou odsávací výkonnost turbíny  $Q_V$ . Ventilátor je umístěn pod regulační klapkou, na konci hřídele turbíny. Navrhovaný průměr ventilátoru je  $\varnothing D = 327$  [mm], díky čemuž vznikne dostatečná mezera  $s_t$  [mm] mezi lopatkami ventilátoru a potrubím. To je důležité mimo jiné z možné tvarové nepřesnosti ventilačního potrubí. Otáčky hřídele turbíny  $n = 1$  [ $s^{-1}$ ]. Průměr náboje ventilátoru  $\varnothing d = 20$  [mm]. Počet lopatek ventilátoru  $p_L = 7$  [–]. Tloušťka lopatky  $t = 1,5$  [mm]. Výška lopatky (ventilátoru)  $h = 100$  [mm]. Výpočet je proveden pro hodnotu úhlu sklonu lopatky na výstupu  $\beta_2 = 86,5$  [°]. V kapitole jsou uvedeny výpočtové vztahy dle [11], [2], [16].

Tab. 17 Tabulka vstupních dat VYTOZ-EKO [37]

ČÍSLO ŘÁDKU	Otáčky ventilátoru	Odsávací výkonnost	Odsávací výkonnost	Rychlost potrubím
	$n$ [ $s^{-1}$ ]	$Q_V$ [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	$Q_V$ [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]	$c_1$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]
1	1,333	0,092	330,0	0,926
2	2,066	0,144	518,5	1,455

ČÍSLO ŘÁDKU	Otáčky ventilátoru	Odsávací výkonnost	Odsávací výkonnost	Rychlost potrubím
	$n [s^{-1}]$	$Q_V [m^3 \cdot s^{-1}]$	$Q_V [m^3 \cdot h^{-1}]$	$c_1 [m \cdot s^{-1}]$
3	3,000	0,211	759,7	2,132
4	4,000	0,286	1029,4	2,889
5	4,416	0,319	1148,4	3,223

- 1) Stanovení průtočné plochy ventilátoru  $S$ :

$$S = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} [m^2] \quad 3.1$$

$$S = \frac{\pi \cdot (0,327^2 - 0,02^2)}{4} = 0,0836 [m^2]$$

Kde:  $\varnothing D$  – průměr ventilátoru  $[m]$ ,  
 $\varnothing d$  – průměr náboje ventilátoru  $[m]$ .

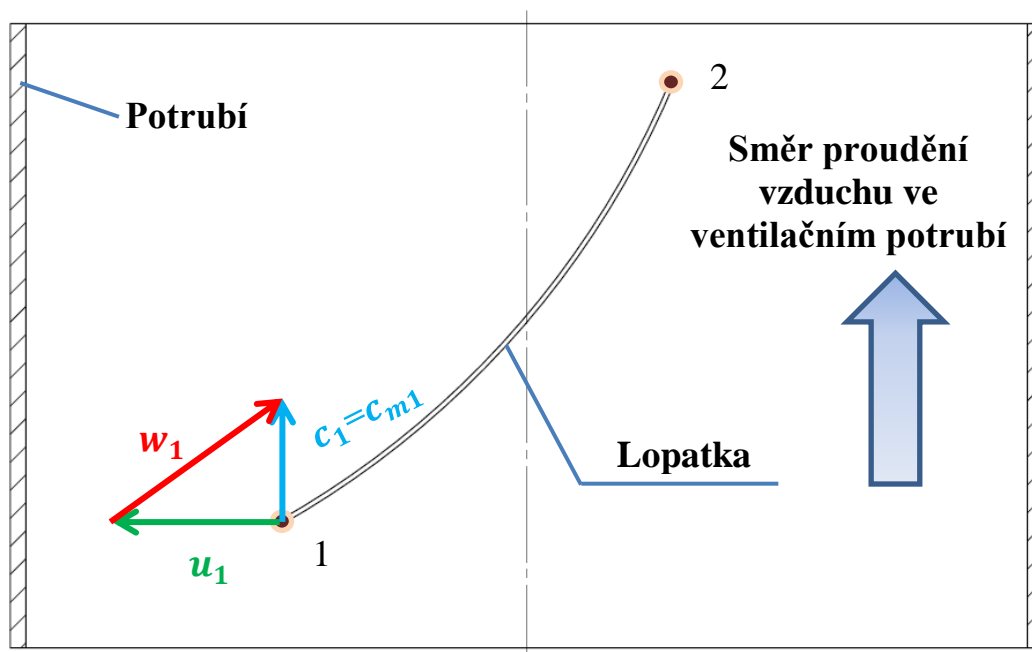
- 2) Stanovení unášivé rychlosti na konci lopatky ventilátoru  $u_{1,2}$ :

$$u_{1,2} = \pi \cdot D \cdot n [m \cdot s^{-1}] \quad 3.2$$

$$u_{1,2} = \pi \cdot 0,327 \cdot 1 = 1,0273 [m \cdot s^{-1}]$$

Kde:  $n$  – otáčky hřídele turbíny  $[s^{-1}]$ .

U axiálních ventilátorů platí podmínka  $u_2 = u_1$ , která byla uvedena v kapitole-3.1.1, přičemž index **1**, zde vždy přísluší *sací* a index **2** *výtokové* straně ventilátoru.



Obr. 83 Schéma lopatky v potrubí – rychlostní trojúhelník sací strana

Protože proud vzduchu vstupuje do ventilátoru ve směru rovnoběžném s jeho osou rotace je úhel vstupu absolutní rychlosti do ventilátoru (úhel mezi unášivou a absolutní složkou rychlosti)  $\alpha_1 = 90^\circ$ , přičemž platí, že  $c_{m1} = c_1$ ,  $c_{m2} = c_{m1}$  a  $c_{u1} = 0 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ .

- 3) Stanovení absolutní rychlosti na sací straně ventilátoru  $c_1$  pro hodnotu otáček  $n = 1 \text{ [s}^{-1}]$  využitím zákona podobnosti dle poměrů rychlosti proudění v potrubí/ otáčky ventilátoru pro řádek č. 1 Tab. 17:

$$\frac{c_1}{1} = \frac{0,926}{1,333} \Rightarrow c_1 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad 3.3$$

$$c_1 = \frac{1 \cdot 0,926}{1,333} = 0,6947 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- 4) Stanovení odsávací výkonnosti (objemového průtoku)  $Q_V$ :

$$Q_V = S \cdot c_1 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad 3.4$$

$$Q_V = 0,0836 \cdot 0,6947 = 0,058 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$Q_V = 0,058 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \approx 210 \text{ [m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$$

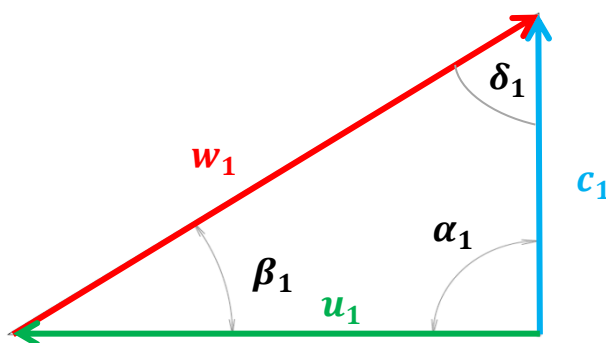
Kde:  $S$  – průtočná plocha ventilátoru  $[\text{m}^2]$ ,  
 $c_1$  – absolutní rychlost na vstupu  $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ .

- 5) Stanovení relativní rychlosti na sací straně ventilátoru  $w_1$ :

$$w_1 = \sqrt{u_1^2 + c_1^2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad 3.5$$

$$w_1 = \sqrt{1,0273^2 + 0,694^2} = 1,239 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Kde:  $u_1$  – unášivá rychlost na vstupu  $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ .



Obr. 84 Rychlostní trojúhelník-sací strana ventilátoru

Rychlostní trojúhelník pro výtakovou stranu ventilátoru je na Obr. 85.

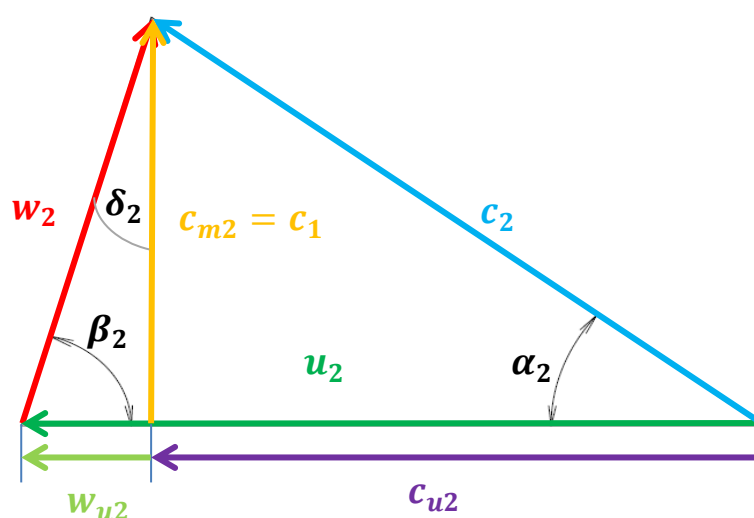
6) Stanovení úhlu sklonu lopatky na sací straně  $\beta_1$ :

$$\tan(\beta_1) = \frac{c_1}{u_1} \Rightarrow \beta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{c_1}{u_1}\right) [^\circ] \quad 3.6$$

$$\beta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{0,6947}{1,0273}\right) = 34,04 [^\circ]$$

Kde:  $u_1$  – unášivá rychlost na vstupu [ $m \cdot s^{-1}$ ],  
 $c_1$  – absolutní rychlost na vstupu [ $m \cdot s^{-1}$ ].

Úhel  $\beta_1$  leží mezi unášivou rychlostí  $u_1$  a relativní rychlostí  $w_1$  viz Obr. 84.



Obr. 85 Rychlostní trojúhelník-výtoková strana ventilátoru  $\beta_2 < 90^\circ$

7) Stanovení relativní rychlosti na výstupu  $w_2$ :

$$w_2 = \frac{c_{m2}}{\sin(\beta_2)} [m \cdot s^{-1}] \quad 3.7$$

$$w_2 = \frac{0,6947}{\sin(86,5)} = 0,696 [m \cdot s^{-1}]$$

Kde:  $c_{m2}$  – meridiální složka absolutní rychlosti [ $m \cdot s^{-1}$ ],  
 $\beta_2$  – úhel sklonu lopatky na výstupu [ $^\circ$ ].

8) Stanovení relativní rychlosti promítnuté do unášivého směru na výstupu  $w_{u2}$ :

$$w_{u2} = w_2 \cdot \cos(\beta_2) [m \cdot s^{-1}] \quad 3.8$$

$$w_{u2} = 0,696 \cdot \cos(86,5) = 0,042 [m \cdot s^{-1}]$$

Kde:  $w_2$  – relativní rychlost na výstupu [ $m \cdot s^{-1}$ ].

9) Stanovení absolutní rychlosti promítnuté do unášivého směru na výstupu  $c_{u2}$ :

$$c_{u2} = u_2 - w_{u2} \text{ [ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ ]} \quad 3.9$$

$$c_{u2} = 1,0273 - 0,042 = 0,9848 \text{ [ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ ]}$$

Kde:  $w_{u2}$  – relativní rychlost promítnutá do unášivého směru na výstupu  $\text{[ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ ]}$ ,  
 $u_2$  – unášivá rychlost  $\text{[ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ ]}$ .

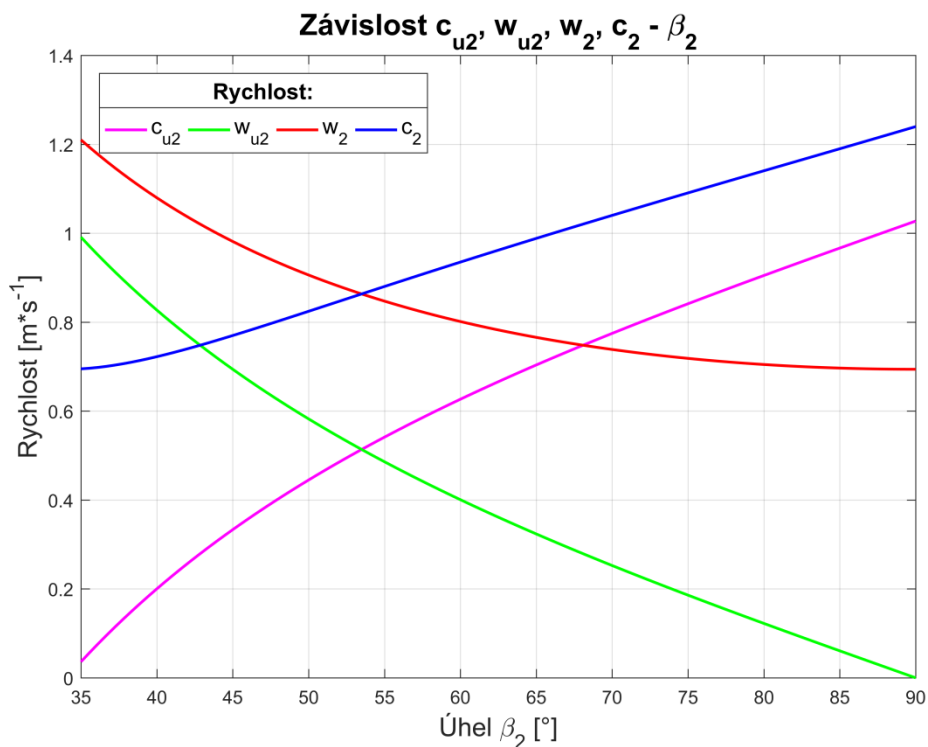
10) Stanovení úhlu absolutní rychlosti na výstupu  $\alpha_2$ :

$$\tan(\alpha_2) = \frac{c_{u2}}{c_{m2}} \Rightarrow \alpha_2 = \tan^{-1} \left( \frac{c_{u2}}{c_{m2}} \right) [^\circ] \quad 3.10$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left( \frac{0,9848}{0,6947} \right) = 35,19 [^\circ]$$

Kde:  $c_{u2}$  – absolutní rychlost promítnutá do unášivého směru na výstupu  $\text{[ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ ]}$ ,  
 $c_{m2}$  – meridiální složka absolutní rychlosti ( $c_{m2} = c_1$ )  $\text{[ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ ]}$ .

Závislost velikosti rychlostí v rychlostních trojúhelnících na změně úhlu  $\beta_2 \in \langle 35, 90^\circ \rangle$  zobrazuje Graf. 3 níže.



Graf. 3 Závislost rychlostí na změně úhlu sklonu lopatky na výstupu  $\beta_2$



11) Stanovení absolutní rychlosti na výstupu  $c_2$ :

$$c_2 = \sqrt{c_{u2}^2 + c_{m2}^2} [m \cdot s^{-1}] \quad 3.11$$

$$c_2 = \sqrt{0,9848^2 + 0,6947^2} = 1,20 [m \cdot s^{-1}]$$

Kde:  $c_{u2}$  – absolutní rychlost promítnutá do unášivého směru na výstupu  $[m \cdot s^{-1}]$ ,  
 $c_{m2}$  – meridiální složka absolutní rychlosti  $[m \cdot s^{-1}]$ .

12) Stanovení ztrátového tlaku  $\Delta p_z$ :

$$\Delta p_z = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot c_{u2}^2 [Pa] \quad 3.12$$

$$\Delta p_z = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 0,9848^2 = 0,625 [Pa]$$

Kde:  $\rho_v$  – měrná hmotnost vzdušiny  $[kg \cdot m^{-3}]$ .

13) Stanovení rozdílu statických tlaků  $\Delta p_s$ :

$$\Delta p_s = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} \cdot \rho_v [Pa] \quad 3.13$$

$$\Delta p_s = \frac{1,239^2 - 0,697^2}{2} \cdot 1,29 = 0,679 [Pa]$$

Kde:  $w_1$  – relativní rychlost na vstupu  $[m \cdot s^{-1}]$ ,  
 $w_2$  – relativní rychlost na výstupu  $[m \cdot s^{-1}]$ .

14) Stanovení celkového tlaku ventilátoru  $\Delta p_{cv}$ :

$$\Delta p_{tEULER} = u_2 \cdot \rho_v \cdot (c_{u2} - c_{u1}) [Pa] \text{ dle [2]} \quad 3.14$$

$$\Delta p_{tEULER} = 1,0273 \cdot 1,29 \cdot (0,9848 - 0) = 1,3051 [Pa]$$

$$\Delta p_{tEULER} = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot (c_2^2 - c_1^2) + \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot (w_1^2 - w_2^2) [Pa] \text{ dle [16]} \quad 3.15$$

$$\Delta p_{tEULER} = \rho_v \cdot u_2^2 - \rho_v \cdot u_2 \cdot \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot D^2 \cdot (1 - \lambda^2)} \cdot \cot(\beta_2) [Pa] \text{ dle [25]} \quad 3.16$$

$$\Delta p_{cv} = \Delta p_s [Pa] \text{ dle [2]} \quad 3.17$$

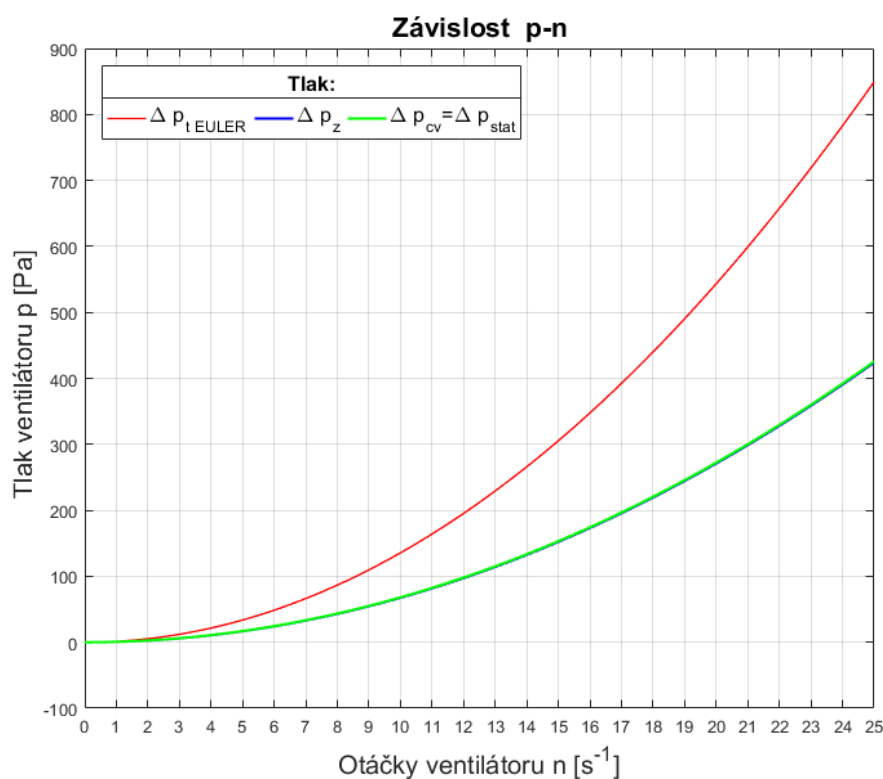
Kde:  $\rho_v$  – měrná hmotnost vzdušiny  $[kg \cdot m^{-3}]$ ,  
 $\varnothing D$  – průměr oběžného kola  $[m]$ ,  
 $Q_v$  – objemový průtok vzduchu  $[m^3 \cdot s^{-1}]$ ,  
 $\lambda$  – nábojový poměr  $d/D$   $[-]$ ,  
 $\beta_2$  – úhel sklonu lopatky na výstupní straně  $[^\circ]$ ,  
 $c_{u1}$  – absolutní rychlost promítnutá do unášivého směru na vstupu  $[m \cdot s^{-1}]$ ,  
 $c_{u2}$  – absolutní rychlost promítnutá do unášivého směru na výstupu  $[m \cdot s^{-1}]$ ,

- $c_1$  – absolutní rychlost na vstupu [ $m \cdot s^{-1}$ ],  
 $c_2$  – absolutní rychlost na výstupu [ $m \cdot s^{-1}$ ],  
 $u_2$  – unášivá rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ],  
 $\Delta p_{tEULER}$  – teoretický Eulerův tlak [ $Pa$ ],  
 $\Delta p_s$  – rozdíl statických tlaků [ $Pa$ ].

Všechny výše uvedené rovnice pro výpočet tlaků odpovídají rovnici teoretického Eulerova tlaku  $\Delta p_{tEULER}$  v jednotlivých modifikacích a jejich výsledky mají shodnou hodnotu.

Nyní pokud bychom požadovali určitou hodnotu  $\Delta p_{cv}$  nebo  $\Delta p_{tEULER}$ , byla by z výše uvedených vztahů vyjádřena jako neznámá (geometrie) - úhel  $\beta_2$ .

V tomto případě naopak požadujeme určitou hodnotu úhlu  $\beta_2$ . Hodnota tlaku  $\Delta p_{cv}$  a  $\Delta p_{tEULER}$  vychází velmi nízká, což lze především přisoudit nízkým otáčkám hřídele turbíny  $n$ . Níže je uveden Graf. 4, zobrazující závislost  $\Delta p - n$ .

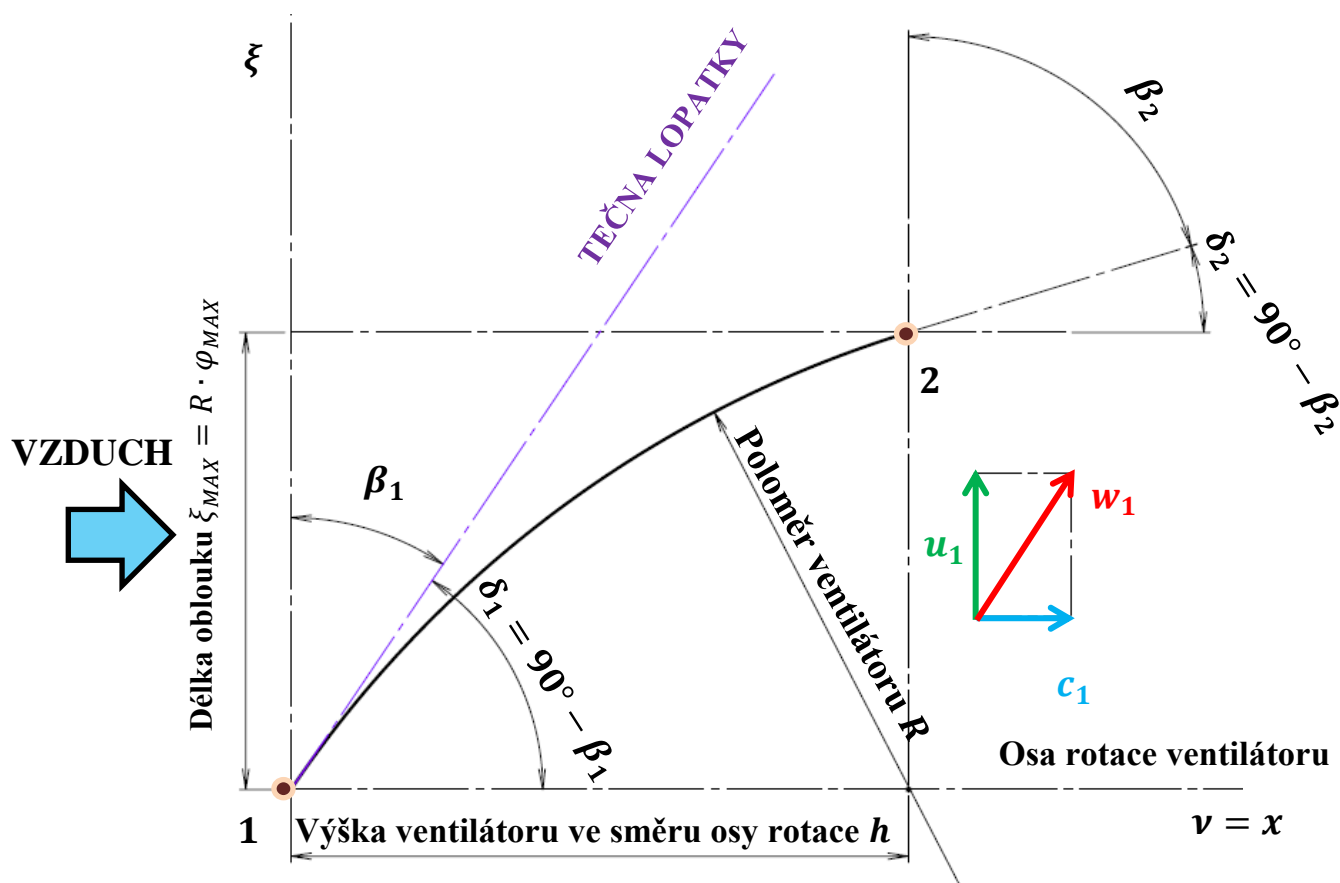


Graf. 4 Závislost tlaku  $\Delta p$  ventilátoru na změně otáček  $n$

Po určení rychlostních trojúhelníků (rychlostí a především úhlů  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ) je možné začít s výpočtem jednotlivých bodů křivky lopatky. Zde je jistá podobnost jako při řešení šroubovice, avšak s tím rozdílem, že u tečny lopatky se jedná o *lineární změnu*  $\tan(\delta)$  v závislosti na souřadnici  $v$ . U šroubovice<sup>24</sup> je to naopak konstanta. Hodnoty souřadnice  $v$  náleží intervalu  $v \in (0, h)$ , kde  $h$  je výška lopatky ventilátoru.

U proměnných jako  $v$ ,  $\xi$ ,  $\varphi$  se indexem  $MAX$  rozumí hodnota proměnné, která odpovídá poslednímu řádku Tab. 18 nebo Tab. 19. U  $R_{MAX}$  přísluší poloměru konce lopatky.

<sup>24</sup> Šroubovice je trajektorie (dráha) bodu při šroubovém pohybu. Všechny tečny šroubovice mají stejný úhel s osou šroubovice, svírají tedy konstantní úhel  $\delta$  s rovinou kolmou k ose šroubovice. Úhlu  $\delta$  říkáme sklon šroubovice,  $\tan(\delta)$  je spád šroubovice a platí pro něj vztah:  $\tan(\delta) = konst.$  [1] Bliže je vztah popsán v literatuře [1].



Obr. 86 Tvar lopatky a její úhlové závislosti

15) Pro úhel  $\bar{\delta}$ , který reprezentuje úhly lopatky, platí rovnice:

$$\tan(\bar{\delta}) = \frac{d_{\xi}}{d_{\nu}} \Rightarrow d_{\xi} = \tan(\bar{\delta}) \cdot d_{\nu} \quad 3.18$$

Okrajové podmínky pro:

$$\nu = 0 \quad \tan(\bar{\delta}) = \tan \delta_1$$

$$\nu = h \quad \tan(\bar{\delta}) = \tan \delta_2$$

Kde:  $h$  – výška lopatky ventilátoru [m],  
 $\nu$  – souřadnice lopatky ve směru osy rotace [m],  
 $\xi$  – souřadnice lopatky kolmá k ose rotace [m],  
 $\delta_1$  – úhel sklonu tečny lopatky na vstupu [°],  
 $\delta_2$  – úhel sklonu tečny lopatky na výstupu [°].

16) Při lineární změně úhlu  $\bar{\delta}$  platí rovnice přímky ve tvaru:

$$\tan \bar{\delta} = k \cdot \nu + q \quad 3.19$$

$$\tan \bar{\delta}_1 = q; \text{ počátek pro } \nu = 0 \quad 3.20$$

Kde:  $k$  – směrnice přímky [ $m^{-1}$ ],  
 $q$  – koeficient [–].

17) Směrnice přímky  $k$ :

$$\tan \bar{\delta}_2 = k \cdot h + \tan \bar{\delta}_1 \Rightarrow k = \frac{\tan \bar{\delta}_2 - \tan \bar{\delta}_1}{h} \quad 3.21$$

Kde:  $k$  – směrnice přímky [ $m^{-1}$ ],  
 $h$  – výška lopatky ventilátoru [ $m$ ].

Dosažením rovnic (3.20) a (3.21) do rovnice (3.19) dostáváme:

18) Souřadnice lopatky  $\xi$ :

$$d_\xi = \left( \frac{\tan \bar{\delta}_2 - \tan \bar{\delta}_1}{h} \cdot v + \tan \bar{\delta}_1 \right) \cdot d_v [m] \quad 3.22$$

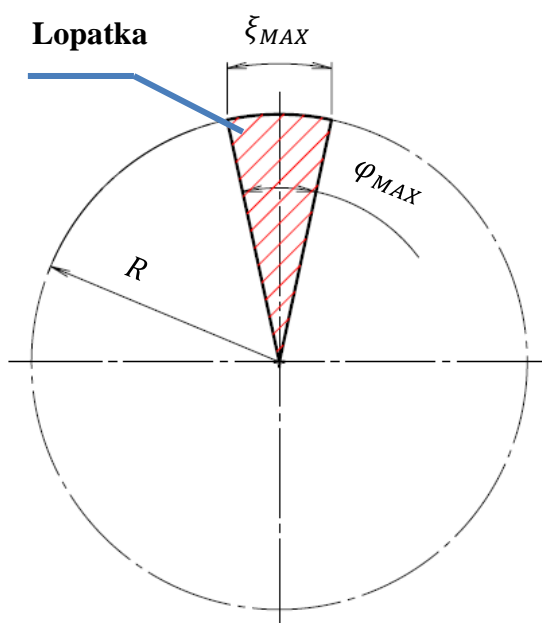
$$\int d_\xi = \int (k \cdot v + q) \cdot d_v [m] \quad 3.23$$

$$\xi = k \cdot \frac{v^2}{2} + q \cdot v + C [m] \quad 3.24$$

$$\text{Pro } v = 0 \wedge \xi = 0 \Rightarrow C = 0 \Rightarrow \xi = k \cdot \frac{v^2}{2} + q \cdot v [m] \quad 3.25$$

$$\xi_{MAX} = k \cdot \frac{h^2}{2} + q \cdot h [m] \quad 3.26$$

Kde:  $h$  – výška lopatky ventilátoru [ $m$ ],  
 $v$  – souřadnice lopatky ve směru osy rotace [ $m$ ],  
 $\xi$  – souřadnice lopatky kolmá k ose rotace [ $m$ ],  
 $\delta_1$  – úhel sklonu tečny lopatky na vstupu [ $^\circ$ ],  
 $\delta_2$  – úhel sklonu tečny lopatky na výstupu [ $^\circ$ ].



Obr. 87 Půdorys ventilátoru-lopatka

Tab. 18 Tabulka válcových souřadnic  $v, \xi, \varphi$

Číslo řádku	$v$ [mm]	$\xi$ [mm]	$\varphi$ [ $^\circ$ ]
1	0	0	0
2	10	14,08	4,93
3	20	26,74	9,37
4	30	37,99	13,31
5	40	47,81	16,75
6	50	56,22	19,70
7	60	63,21	22,15
8	70	68,79	24,10
9	80	72,94	25,56
10	90	75,68	26,52
11	100	77,00	26,98

Úhlová délka oblouku lopatky  $\varphi$  je vyznačena na Obr. 87.

19) Úhlová délka oblouku lopatky  $\varphi_{MAX}$ :

$$\varphi = \frac{\xi}{R_{MAX}} [\text{rad}] \quad 3.27$$

$$\varphi_{MAX} = \frac{\xi_{MAX}}{R_{MAX}} [\text{rad}] \quad 3.28$$

Kde:  $\xi_{MAX}$  – maximální hodnota souřadnice lopatky kolmé k ose rotace [m],  
 $R_{MAX}$  – poloměr na konci lopatky (poloměr ventilátoru) [m].

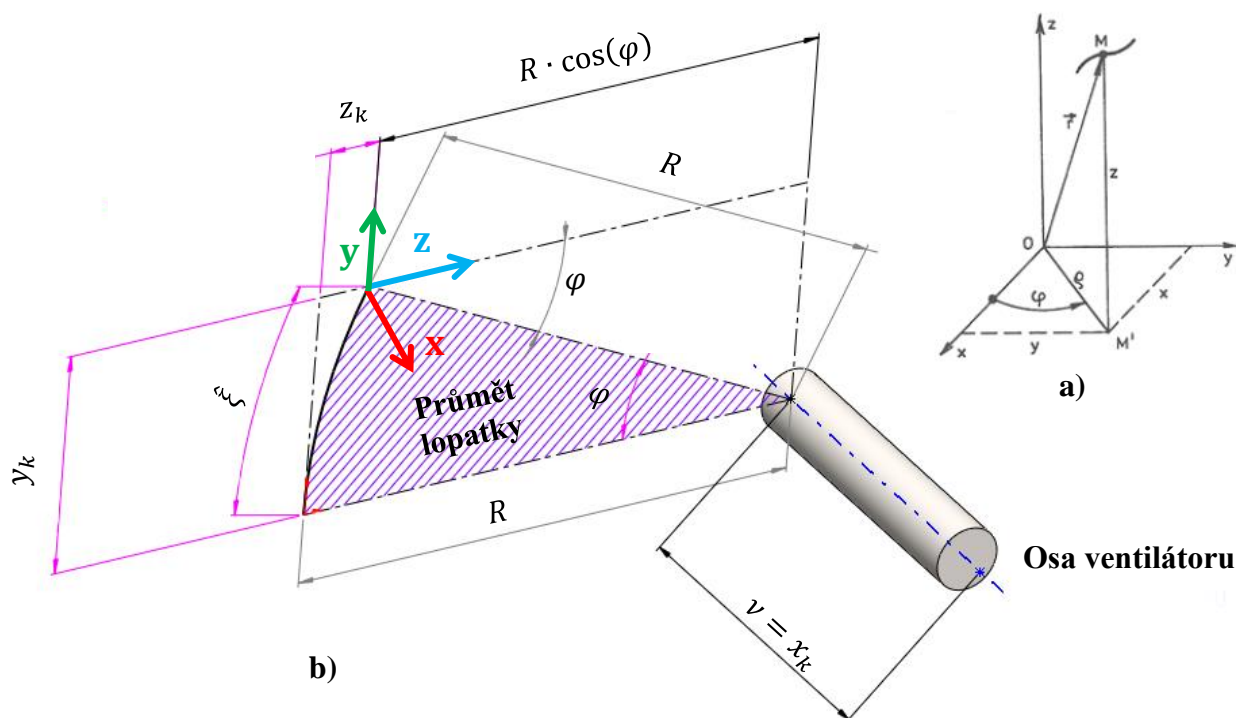
Nyní se souřadnice válcové<sup>25</sup>  $\nu, \xi, \varphi$  uvedené v Tab. 18 převedou na souřadnice kartézské  $x, y, z$  viz Tab. 19, aby bylo možné s těmito daty dále pracovat v programu Solidworks. Na Obr. 89 a Obr. 90 je zobrazena křivka lopatky ventilátoru v jednotlivých pohledech.

20) Převod na kartézské souřadnice v osách  $x, y, z$ :

$$x_k = \nu \quad 3.29$$

$$y_k = R \cdot \sin(\varphi) \quad 3.30$$

$$z_k = -(R - R \cdot \cos(\varphi)) \quad 3.31$$



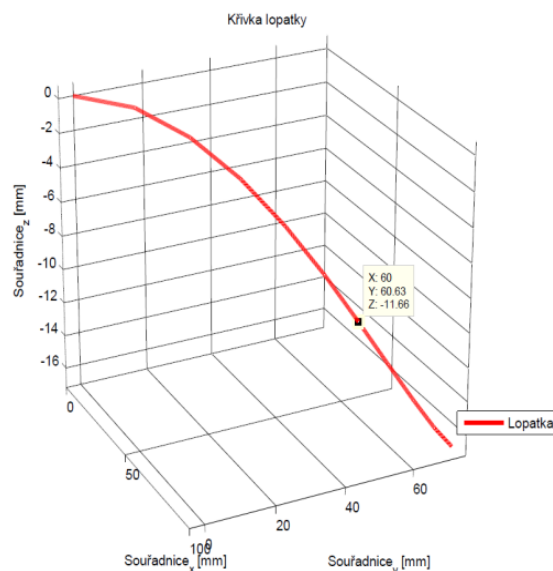
Obr. 88 Převod válcových souřadnic na kartézské souřadnice.  
 a) obecný případ [13]. b) aplikované řešení

<sup>25</sup> Obecně se ve válcových souřadnicích určuje poloha bodu poloměrem  $\rho$ , úhlem  $\varphi$  a souřadnicí  $z$ . Převod na kartézské souřadnice popisují vztahy:  $x = \rho \cdot \cos(\varphi)$ ;  $y = \rho \cdot \sin(\varphi)$ ;  $z = z$ , viz Obr. 88a. [13]

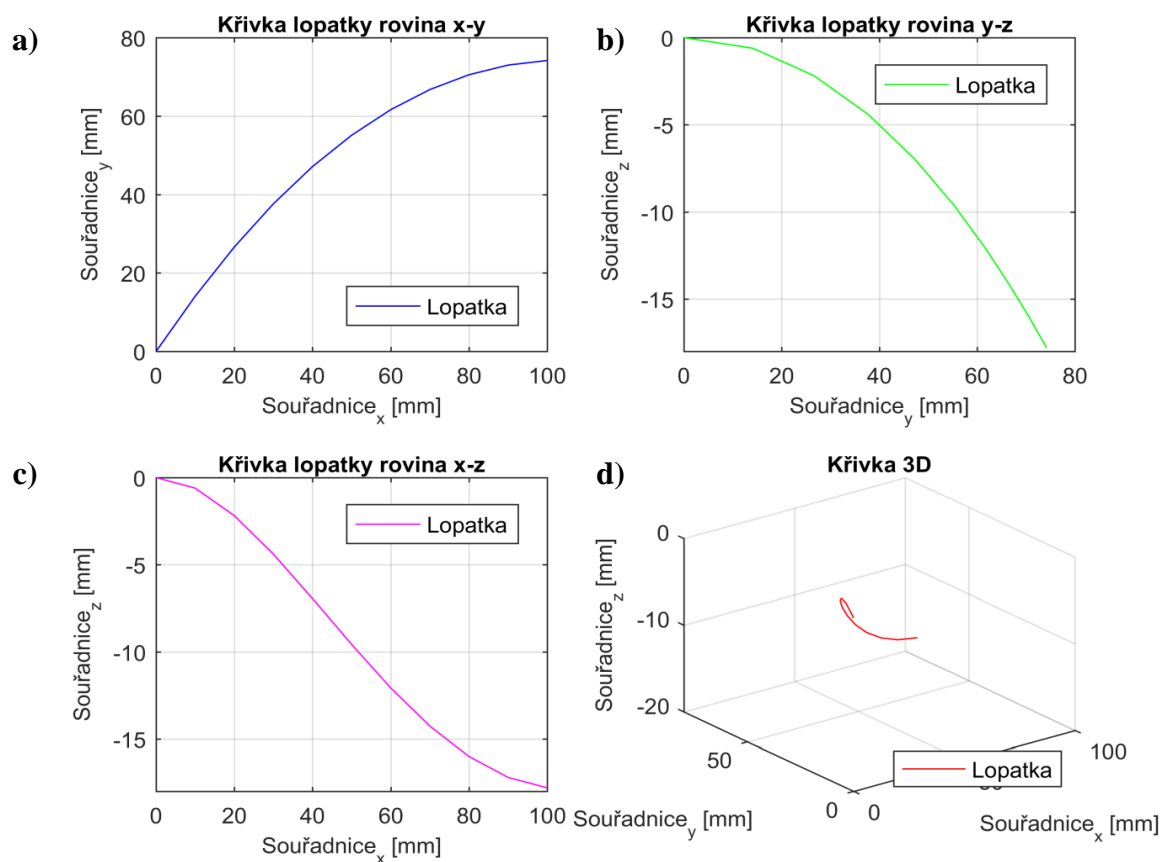
Na Obr. 88b je pootočený souřadný systém oproti Obr. 88a při převodu válcových souřadnic na kartézské souřadnice lopatky, které udávají vztahy (3.29), (3.30) a (3.31).

Tab. 19 Tabulka převedených kartézských souřadnic  $x, y, z$

Číslo řádku	$x_k$ [mm]	$y_k$ [mm]	$z_k$ [mm]
1	0	0	0
2	10	14,06	-0,61
3	20	26,62	-2,18
4	30	37,64	-4,39
5	40	47,13	-6,94
6	50	55,12	-9,57
7	60	61,65	-12,07
8	70	66,77	-14,26
9	80	70,55	-16,00
10	90	73,01	-17,20
11	100	74,18	-17,80



Obr. 89 3D křivka lopatky ventilátoru



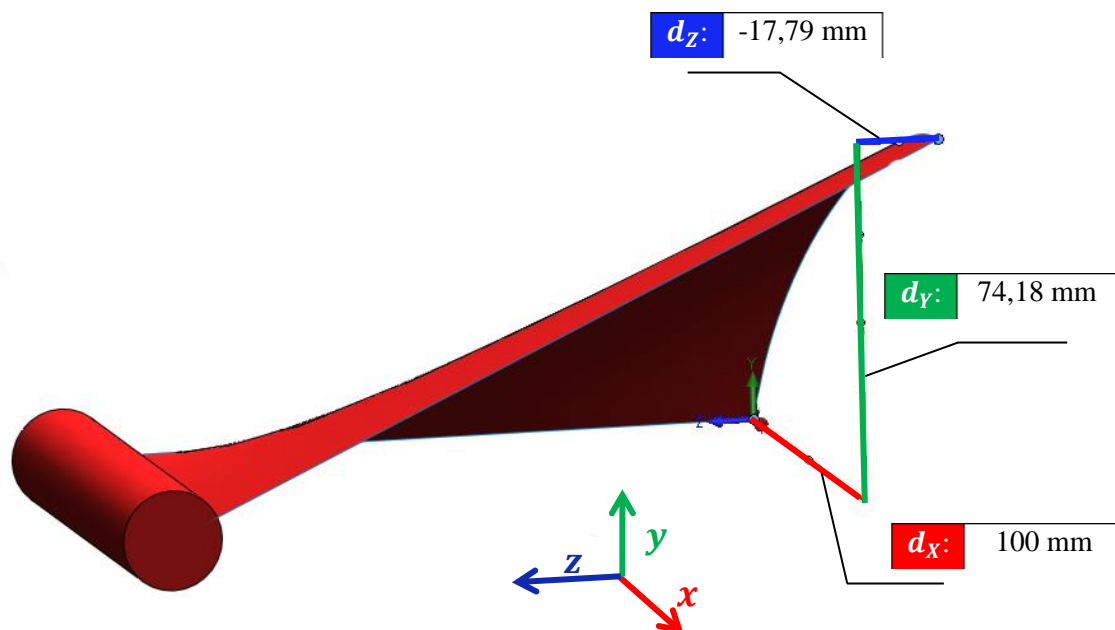
Obr. 90 Křivka lopatky ventilátoru v jednotlivých rovinách.

a)  $x - y$ . b)  $y - z$ . c)  $x - z$ . d) 3D křivka

### 3.1.3 3D MODEL AXIÁLNÍHO VENTILÁTORU VENTILAČNÍ TURBÍNY

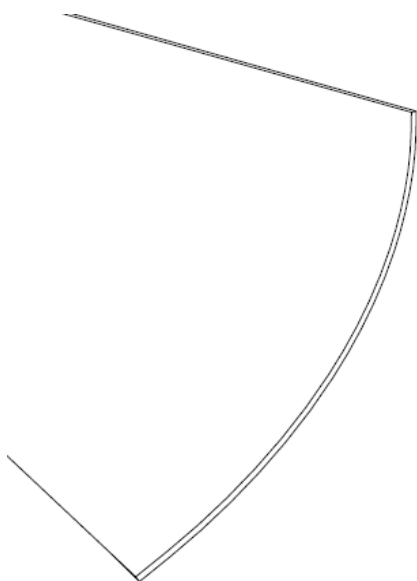
Po získání kartézských souřadnic  $x, y, z$  křivky lze vytvořit 3D model ventilátoru. Mezi zadávané parametry patří: průměr (poloměr) ventilátoru  $\varnothing D = 327$  [mm], průměr náboje ventilátoru  $\varnothing d = 20$  [mm], počet lopatek ventilátoru  $p_L = 7$  [–], tloušťka lopatky  $t = 1,5$  [mm], výška lopatky (ventilátoru)  $h = 100$  [mm].

Po vytvoření modelu je důležitá kontrola zda hodnoty geometrie v 3D modelu jsou shodné s hodnotami souřadnic uvedenými v Tab. 19. Tento krok je zobrazen na Obr. 91, čehož vyplývá, že souřadnice  $x, y, z$  jsou zadány správně.

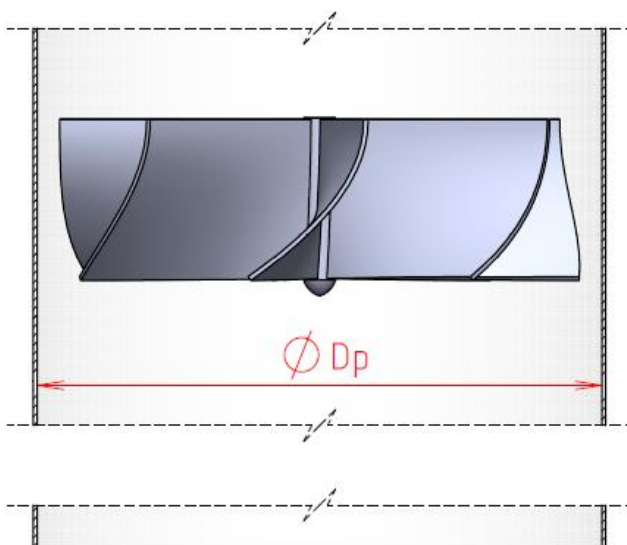


Obr. 91 Kontrola souřadnic 3D modelu lopatky

Na Obr. 93 je lopatka ventilátoru samostatně a na Obr. 92 je zobrazena poloha axiálního ventilátoru ve ventilačním potrubí.

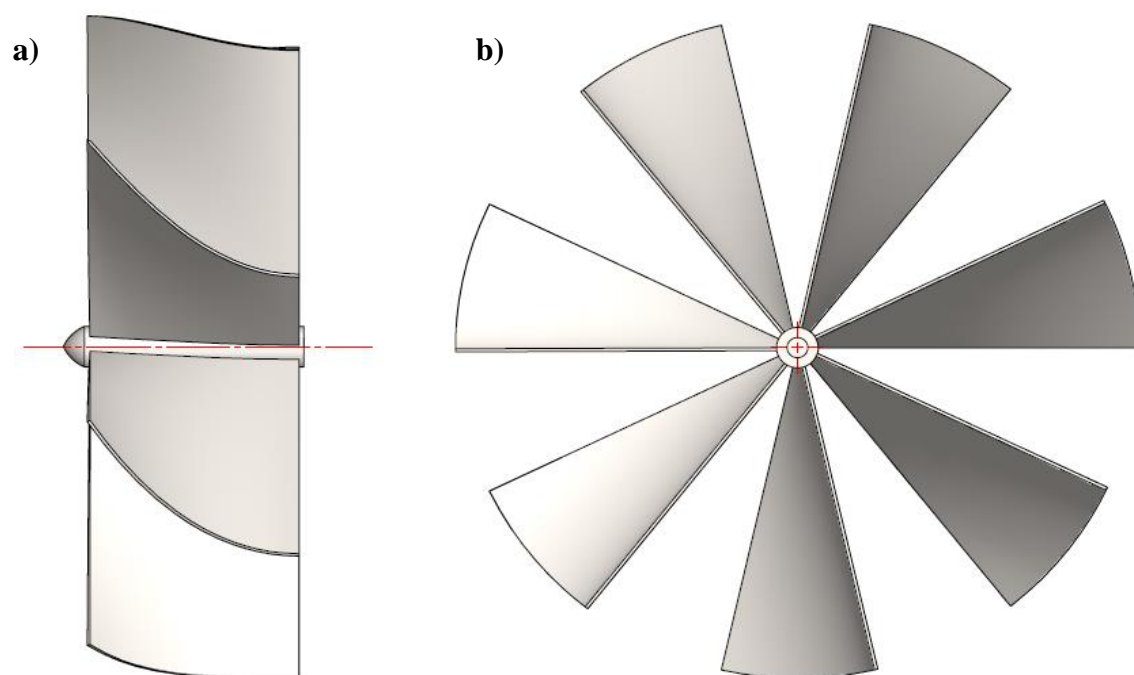


Obr. 93 Model lopatka ventilátoru

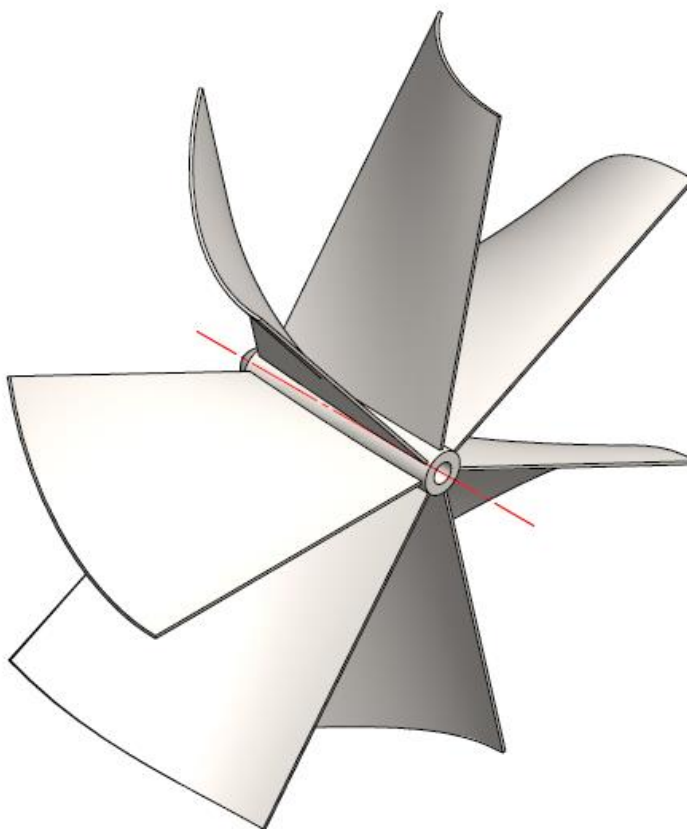


Obr. 92 Axiální ventilátor ve ventilačním potrubí

Výsledné pohledy na axiální ventilátor jsou na Obr. 94 a Obr. 95.



*Obr. 94 Model axiální ventilátor.  
a ) pravý pohled. b ) horní pohled*



*Obr. 95 Model axiální ventilátor izometrický pohled*



### 3.2 SOFTWAREVÁ APLIKACE VENTILATOR

Tato část kapitoly je zaměřena na softwarovou automatizaci výpočtu tvarů lopatky axiálního ventilátoru. Z důvodu možnosti opakování výpočtu (snadné změny hodnot) tvaru lopatek je vhodné vytvořit systém výpočtu např. v prostředí *MS Excel*, *MathCad*, *MATLAB* nebo *SciLab*. Tím se podstatně zkrátí doba výpočtu, umožní to vykreslení požadovaných grafů a export *txt* či *pdf* souborů s daty výpočtu, se kterými lze dále pracovat.

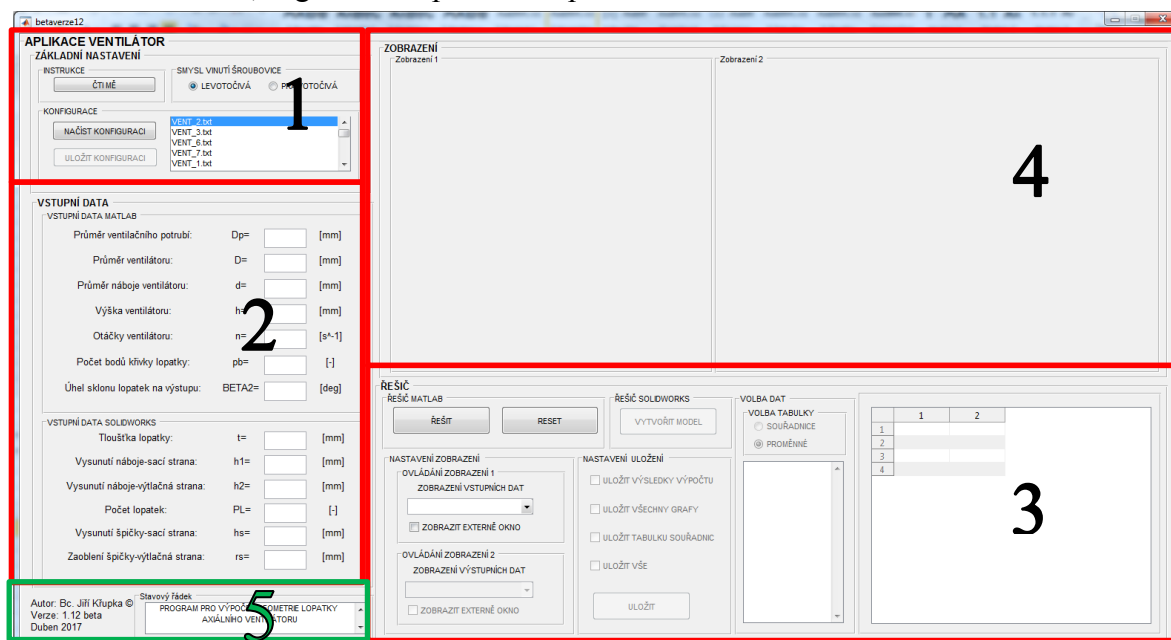
V tomto případě výpočet probíhá v prostředí softwaru *MATLAB*, ve kterém byla aplikace *VENTILATOR* vytvořena a to formou naprogramovaných scriptů<sup>26</sup>. Aplikace tvoří rozhraní („most“) mezi technickým softwarem *MATLAB* a CAD softwarem *SolidWorks*.

#### 3.2.1 ÚVOD, CÍL A POPIS APLIKACE

Cílem aplikace je provést ze zadaných parametrů matematický výpočet včetně grafické reprezentace výsledků výpočtu, možnosti uložení těchto výsledků a vytvoření CAD modelu.

Vyvinutá softwarová aplikace slouží pro návrh a výpočet lopatky axiálního ventilátoru ventilační turbíny a následně samotného ventilátoru. Pro výpočet jsou aplikovány rovnice uvedené v kapitole-3.1.2 (metoda lineární změna úhlu  $\tan(\delta)$ ). Její použití umožňuje rychlou změnu parametrů, tím kompenzuje čas při opakovaném návrhu lopatky ventilátoru na efektivní hodnotu.

Vyvinutá aplikace je zpracována jako „standalone“<sup>27</sup> application“ s grafickým rozhraním GUI<sup>28</sup> v prostředí *MATLAB*. Grafické rozhraní GUI umožňuje interakci mezi uživatelem aplikace a samotným výpočtním programem (scriptem) uvnitř aplikace prostřednictvím grafických objektů jako jsou „uitable“, „icontrol“ a dalších. Po interakci uživatele na tyto grafické ovládací objekty (*pushbutton*, *checkbox* atd.) je výstupem v „pozadí“ aplikace provedení naprogramovaného skriptu a v „popředí“ je to pouze zobrazení této události (např. zatržení *checkboxu*) v grafickém prostředí aplikace.



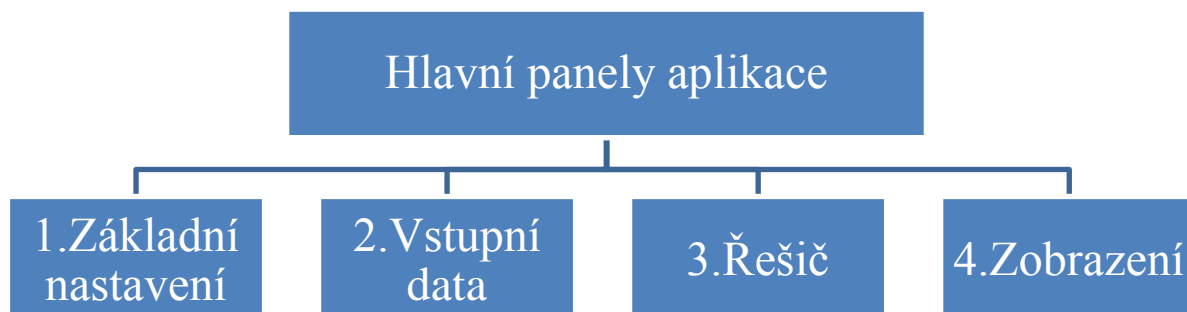
Obr. 96 Aplikace *VENTILATOR*-grafické okno programu

<sup>26</sup> Scripty obsahují posloupnost příkazů a povelů systému *MATLAB*. [20]

<sup>27</sup> Aplikaci je vhodné vytvořit jako tzv. „standalone“, pokud chceme spouštět *MATLAB m-script* na cílovém PC, na kterém není *MATLAB* nainstalován. Pro spuštění *m-scriptu* je nutná instalace tzv. *MATLAB Runtime*. [33]

<sup>28</sup> Všechny grafické objekty aplikace tvoří společně grafické uživatelské prostředí. V angličtině se pro toto prostředí vžila zkratka *GUI* (Graphical User Interface). [20]

Pro spuštění aplikace *Ventilátor GUI.exe* je nutná iniciace tohoto souboru v systému Windows. Po spuštění se zobrazí grafické okno aplikace s ovládacími prvky, které jsou rozděleny do několika samostatných panelů plnících jednotlivé funkce. Názvy panelů reprezentují obvykle předmět použitých funkcí.

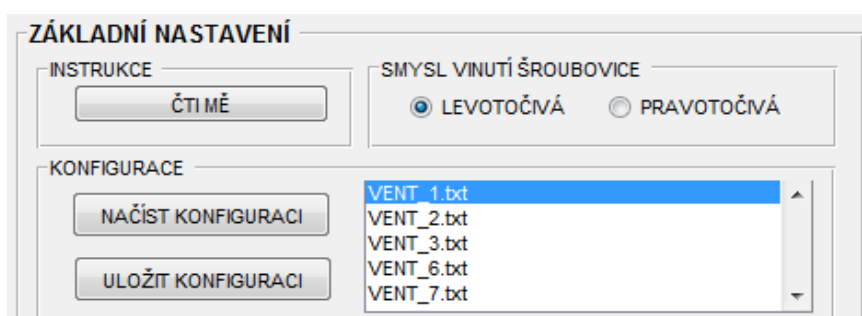


Uživatel po výběru základního nastavení v hlavním panelu **1** zadává, popřípadě načítá hodnoty vstupních proměnných pro MATLAB i Solidworks do hlavního panelu **2**. Pro výběr grafické nápovědy k vstupním proměnným slouží *panel - nastavení zobrazení (ovládání zobrazení 1)* v hlavním panelu **3**. Zde je možné pro některé zadávané proměnné nalézt grafickou podporu (GH) formou obrázku. Po zadání všech vstupních proměnných lze tlačítkem „ŘEŠIT“ v hlavním panelu **3** spustit výpočet. Tím dojde k zobrazení vykreslených grafů v hlavním panelu **4**, kterými lze jednotlivě listovat v *panelu - nastavení zobrazení (ovládání zobrazení 2)*, jež je součástí hlavního panelu **3**. Další možností je externí zobrazení grafů mimo GUI. Dále po stisku tlačítka „ŘEŠIT“ dojde k zobrazení souřadnic 3D křivky lopatky v *panelu - tabulka* a k uvolnění přepínače mezi *výstupními souřadnicemi 3D křivky a proměnnými výpočtu v hlavním panelu 3*. Po přepnutí přepínače na „PROMĚNNÉ“ se v okně umístěném pod ním zobrazí názvy jednotlivých proměnných vstupních i výstupních a po výběru, kterékoliv z nich se její hodnota spolu s jednotkou zobrazí v *panelu - tabulka* v pravém dolním rohu grafického okna aplikace. Dojde také k uvolnění *panelu-nastavení uložení* a nakonec uvolnění *panelu - řešič SolidWorks* a tím současně zpřístupnění všech funkcí jednotlivých panelů. Stiskem tlačítka „RESET“ se vrátí vše do defaultního spouštěcího nastavení. V pomocném hlavním panelu **5** je umístěno textové pole „STAVOVÝ ŘÁDEK“, který slouží k informování uživatele o provedení konkrétní akce v prostředí aplikace.

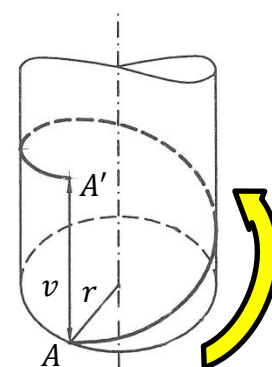
### 3.2.2 PODROBNÝ POPIS APLIKACE

V této podkapitole jsou blíže popsány funkce aplikace VENTILATOR.

#### 3.2.2.1 HLAVNÍ PANEL ZÁKLADNÍ NASTAVENÍ:



Obr. 98 Hlavní panel Základní nastavení



Obr. 97 Šroubovice pravotočivá [1]

**Panel instrukce** - obsahuje tlačítko „ČTI MĚ“ po jehož inicializaci dojde k zobrazení souboru s návodem (instrukcemi) k programu.

**Panel konfigurace** - obsahuje *pushbutton* „NAČÍST KONFIGURACI“ po jehož inicializaci dojde k vyplnění hodnot všech proměnných v hlavním panelu 2 daty konfigurace, které obsahují načítané soubory VENT\_1.txt, VENT\_2.txt atd. Konkrétní soubor lze vybrat v listboxu na pravé straně panelu (označený soubor je zvýrazněn modře). Konfiguraci lze vytvořit vyplněním hodnot proměnných v hlavním panelu 2 a následnou inicializací *pushbutton* „ULOŽIT KONFIGURACI“ je možné konfiguraci uložit. Soubor lze v prostředí Windows dále přejmenovat podle potřeby, při zachování formátu „VENT\_vlastní název“ pro možné opětovné načtení souboru do aplikace.

**Panel smysl vinutí šroubovice** - obsahuje dva *radiobutton* „LEVOTOČIVÁ“ a „PRAVOTOČIVÁ“, kterými lze nastavit smysl vinutí<sup>29</sup> šroubovice. Za pravotočivou šroubovici se považuje taková, kde delší konec lopatky jde ve směru hodinových ručiček.

### 3.2.2.2 HLAVNÍ PANEL VSTUPNÍ DATA:

Tento hlavní panel je rozdělen z hlediska zadávaných proměnných (do prvků *edit text*) na dvě části. Jednak jsou to vstupní proměnné pro výpočet v MATLABU a dále jsou to vstupní proměnné související s vytvořením geometrie v programu Solidworks.

#### Panel vstupní data MATLAB:

Tab. 20 Vstupní data pro MATLAB

Obr. 99 Panel Vstupní data pro MATLAB

Symbol	Interval hodnot	Pozn.
$D_p$	$D_p \in (0, 1000) [mm]$	GH
$D$	$D \in (0, D_p) [mm]$	GH
$d$	$d \in (0, D) [mm]$	GH
$h$	$h \in (0, 1000) [mm]$	GH
$n$	$n \in (0, 50) [s^{-1}]$	
$p_b$	$p_b \in (5, \infty) [-]$	
$\beta_2$	$\beta_2 \in (0, 90) [^\circ]$	

Na Obr. 99 je zobrazen panel pro zadání vstupních dat pro MATLAB. Všechny uvedené proměnné v Tab. 20 byly již v minulých kapitolách popsány kromě proměnné  $p_b$ , která označuje počet bodů křivky lopatky. S rostoucí hodnotou  $p_b$  mají grafy hladší průběh po vykreslení dat (bez ovlivnění přesnosti dat). Doporučená hodnota  $p_b > 10 [-]$ , jinak obvykle dochází k chybám při zobrazení grafů.

Označení GH, v Tab. 20, značí možnost využití grafické nápovědy dostupné v *panelu-nastavení zobrazení (ovládání zobrazení 1)*.

<sup>29</sup> Smysl vinutí - orientaci šroubovice definuje popis: Je-li osa šroubovice svislá a pozorovatel stojí vně nosné válcové plochy, *pravotočivá šroubovice* stoupá napravo viz. Obr. 97 a *levotočivá šroubovice* stoupá nalevo. [1]

**Panel vstupní data SOLIDWORKS:**

Kvůli modelu bylo nutné definovat některé proměnné, které dosud nebyly zmíněny. Jedná se zejména o vysunutí náboje na vstupní a výstupní straně o výšku  $h_1$  a  $h_2$ , které jsou obecně na obou stranách délkovým přírůstkem oproti výšce lopatky  $h$ , která se tak zvětšuje na výšku ventilátoru  $h_{celk} = h + h_1 + h_2$ , přičemž interval hodnot je uveden v Tab. 21. Pokud mají být hodnoty  $h_1$  a  $h_2$  rozměrově nevýrazné, stačí je nastavit na hodnotu dolní hranice intervalu uvedeného v Tab. 21. Tedy zadáním hodnoty např. 0,001 [mm] nebo 0,0001 [mm] se prvek v modelu Solidworksu minimalizuje, avšak nepotlačí.

Tab. 21 Vstupní data pro Solidworks

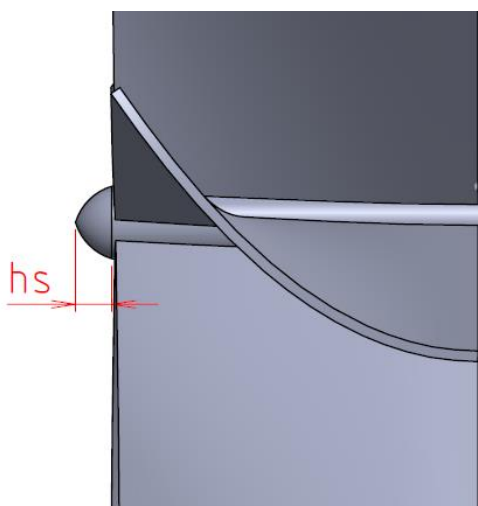
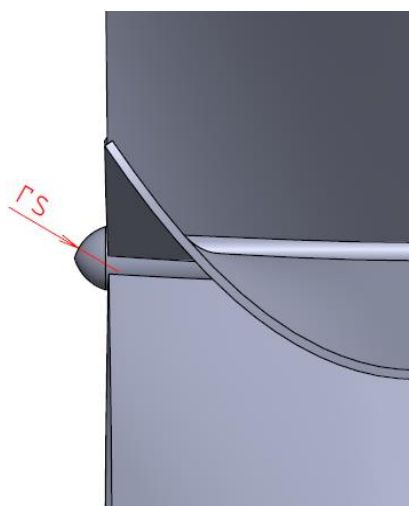
VSTUPNÍ DATA SOLIDWORKS		
Tloušťka lopatky:	t=	<input type="text"/> [mm]
Vysunutí náboje-sací strana:	h1=	<input type="text"/> [mm]
Vysunutí náboje-výtlačná strana:	h2=	<input type="text"/> [mm]
Počet lopatek:	PL=	<input type="text"/> [-]
Vysunutí špičky-sací strana:	hs=	<input type="text"/> [mm]
Zaoblení špičky-výtlačná strana:	rs=	<input type="text"/> [mm]

Obr. 100 Panel Vstupní data pro Solidworks

Symbol	Interval hodnot	Pozn.
$t$	$t \in (0, d/2)$ [mm]	GH
$h_1$	$h_2 \in \langle 0,0001, h/2 \rangle$ [mm]	GH
$h_2$	$h_2 \in \langle 0,0001, h/2 \rangle$ [mm]	GH
$p_L$	$P_L \in \langle 2, \infty \rangle$ [-]	GH
$h_s$	$h_s \in \langle 0,0001, h \rangle$ [mm]	GH
$r_s$	$r_s \in \langle 0,0001, \infty \rangle$ [mm]	GH

Označení GH, v Tab. 20, značí možnost využití grafické nápovědy dostupné v *panelu-nastavení zobrazení (ovládání zobrazení 1)*. Ukázka z grafické nápovědy je na Obr. 102 a Obr. 101.

Dále jsou v Tab. 21 uvedeny proměnné jako  $h_s$  a  $r_s$ , které charakterizují výšku zaoblení a poloměr náboje na vstupní (sací) straně ventilátoru.

Obr. 102 Grafická nápověda proměnná  $h_s$ Obr. 101 Grafická nápověda proměnná  $r_s$

### 3.2.2.3 HLAVNÍ PANEL ŘEŠIČ:

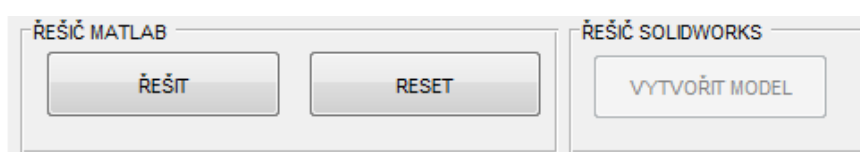
**Panel řešič MATLAB** - obsahuje dvě *pushbutton* „ŘEŠIT“ a „RESET“.

*Pushbutton* „ŘEŠIT“ spouští výpočet, po jehož dokončení jsou dostupné proměnné, souřadnice 3D křivky, grafy a následně lze vytvořit model ventilátoru v *panelu* - Řešič Solidworks.

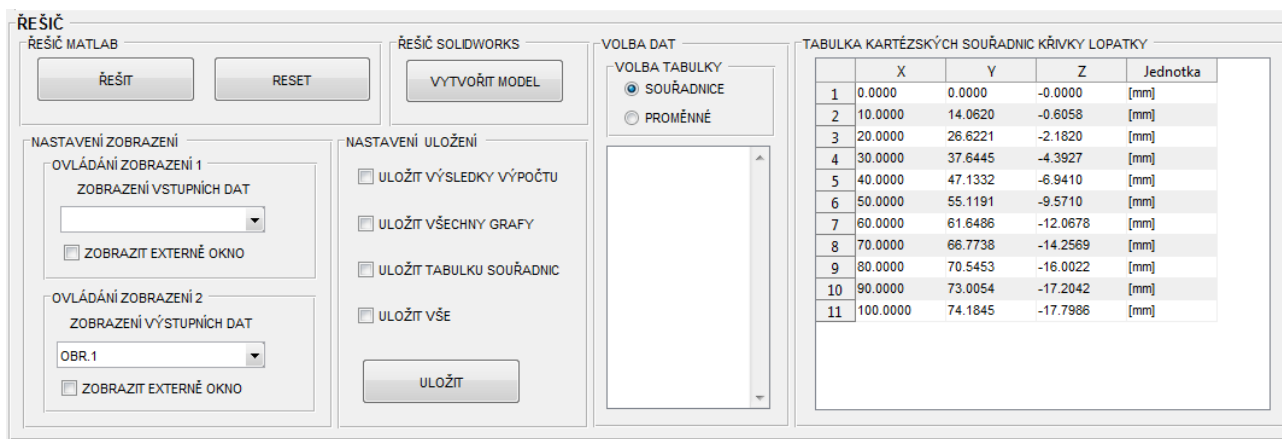
*Pushbutton* „RESET“ po jehož inicializaci dojde k vymazání veškerých výsledků výpočtu proměnných, grafů, tabulek. A nastavení se vrátí zpět do defaultního nastavení aplikace.

**Panel řešič SolidWorks** - obsahuje *pushbutton* „VYTVOŘIT MODEL“.

Po jeho inicializaci dojde k spuštění Solidworksu ve Windows a vytvoření dílu s konfigurační hodnotou ze zadávaných a vypočtených proměnných aplikace VENTILATOR.



Obr. 103 Panel Řešič MATLAB a Solidworks



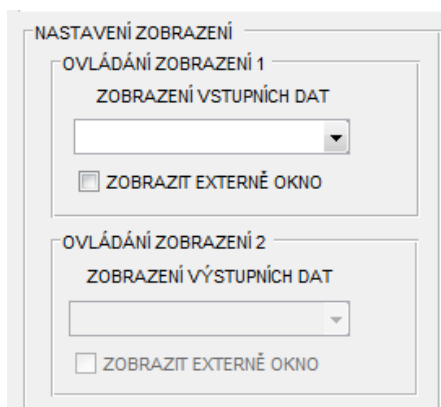
Obr. 104 Hlavní panel Řešič

**Panel nastavení zobrazení** - se sestává ze dvou panelů „OVLÁDÁNÍ ZOBRAZENÍ 1“ a „OVLÁDÁNÍ ZOBRAZENÍ 2“ pro ovládání grafických oken.

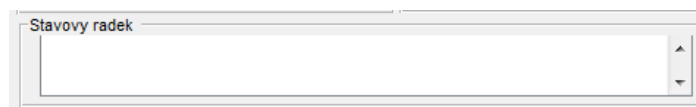
Každý panel obsahuje *pop-up menu* pro výběr příslušné položky pro zobrazení a *checkbox* pro volbu zobrazení v externím okně mimo GUI. V externím okně jsou dostupné funkce MATLABU pro úpravu nastavení zobrazení obrázků, které v GUI nejsou dostupné.

Panel „OVLÁDÁNÍ ZOBRAZENÍ 1“ slouží pro zobrazení grafické nápovědy k některým proměnným zadávaných v hlavním panelu 2 - **vstupní data**. Použitím *pop-up menu* lze vybrat nápovědu pro konkrétní proměnnou, pokud je dostupná. K zobrazení dojde v hlavním panelu 4 - **zobrazení**. Obsah lze zobrazit také v externím okně vybráním *checkboxu*.

Panel „OVLÁDÁNÍ ZOBRAZENÍ 2“ slouží pro zobrazení grafů po provedení výpočtu. Použitím *pop-up menu* lze vybrat konkrétní graf pro zobrazení. K zobrazení dojde v hlavním panelu 4 - **zobrazení**. Obsah lze zobrazit také v externím okně vybráním *checkboxu*.



Obr. 105 Panel Nastavení zobrazení



Obr. 106 Pomocný hlavní panel Stavový řádek

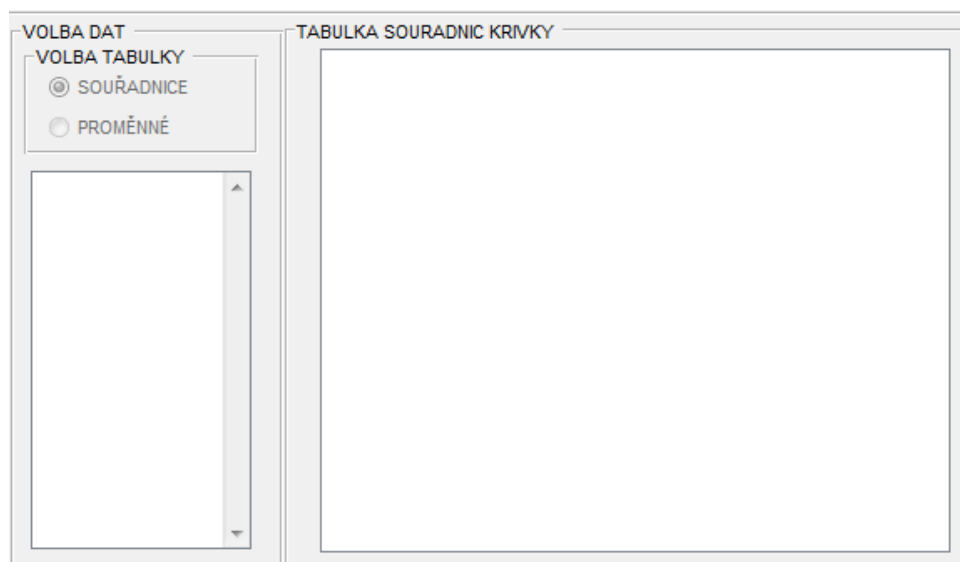
**Panel stavový řádek** - obsahuje pouze prvek *edit text*

V okně *edit textu* se zobrazuje záznam o klíčových interakcích uživatele během práce v aplikaci např. výběr šroubovice, spuštění výpočtu, reset výpočtu a další. K zobrazení dojde v pomocném hlavním panelu 5.

**Panel volba dat** - tento panel spolu s tabulkou v pravém dolním rohu *GUI* fungují vždy ve vzájemné interakci.

Panel obsahuje dva *radiobutton* „*SOUŘADNICE*“ a „*PROMĚNNÉ*“, kterými lze nastavit zobrazení vypočtených dat a jeden *listbox*, ve kterém se zobrazují názvy zadávaných a vypočtených proměnných z výpočtu v případě výběru *radiobutton* „*PROMĚNNÉ*“.

Volba *radiobutton* „*SOUŘADNICE*“ zobrazí v tabulce kartézské souřadnice  $x, y, z$  3D-křivky lopatky axiálního ventilátoru. Takto zobrazená data lze po jejich označení pomocí známé kombinace kláves *Ctrl+c* zkopírovat do paměti.



Obr. 107 Panel Volba dat a Tabulka

Volba *radiobutton* „*PROMĚNNÉ*“ zobrazí v *listboxu* seznam zadávaných a vypočtených proměnných a současně první z nich zobrazí v tabulce. Výběrem proměnné



v *listboxu* se vždy její hodnota zobrazí v tabulce napravo spolu s jednotkou. Takto zobrazená data lze po jejich označení pomocí známé kombinace kláves *Ctrl+c* zkopírovat do paměti.

**Panel tabulka** - tabulka funguje vždy ve vzájemné interakci s *panelem volba dat*. Název *panelu tabulky* je zde relativní, protože jeho název je daný výběrem *radiobutton* „SOUŘADNICE“ nebo „PROMĚNNÉ“. Po stisku tlačítka „ŘEŠIT“ se defaultně zobrazí souřadnice 3D-křivky.

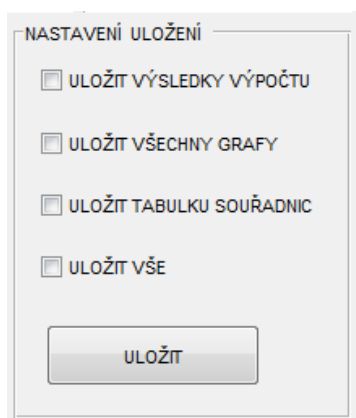
Při výběru *radiobutton* „PROMĚNNÉ“ je název *panelu tabulky* shodný s aktuálně vybranou proměnnou v *listboxu*. Defaultně se v tabulce zobrazí první proměnná na seznamu v *listboxu*.

**Panel nastavení uložení** - tento panel se stane přístupným po dokončení výpočtu křivky lopatky a umožňuje reprezentované výsledky výpočtu z *GUI* uložit do externích souborů. Součástí panelu je *pushbutton* „ULOŽIT“ a čtveřice *checkboxů*, které nabízí jednotlivé položky k uložení. Po výběru příslušného *checkboxu* a následném stisku *pushbutton* „ULOŽIT“ se požadovaná data uloží do uživatelem definované složky.

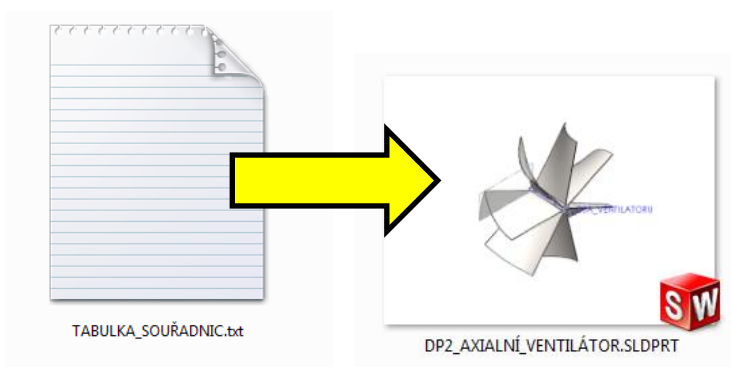
Funkce jsou následující:

- první volba uloží výstupní proměnné do souboru „.txt“
- druhá volba uloží všechny grafy zobrazené v *GUI* do souboru „.png“
- třetí volba uloží tabulku kartézských souřadnic 3D-křivky lopatky do souboru „.txt“
- čtvrtá volba označí všechny volby a uloží vše najednou na požadované místo

Prvkem *pushbutton* „ULOŽIT“ se po vybrání jednotlivých *checkboxů* provede uložení do externích souborů.



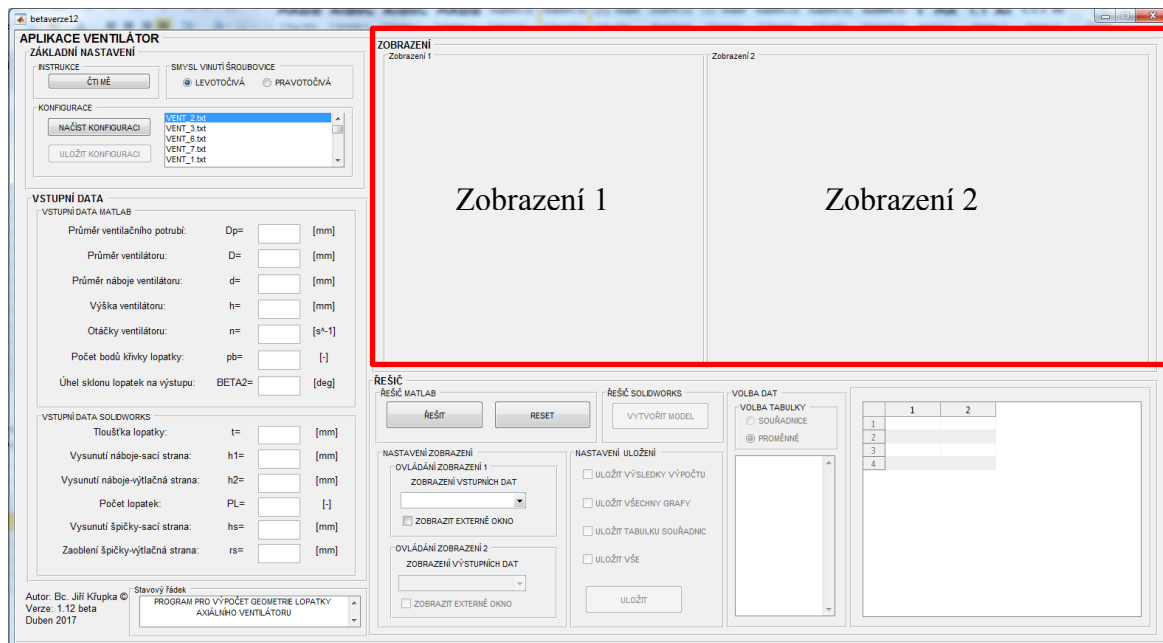
Obr. 108 Panel Nastavení uložení



Obr. 109 Ukládaná data VENTILATOR



### 3.2.2.4 HLAVNÍ PANEL ZOBRAZENÍ



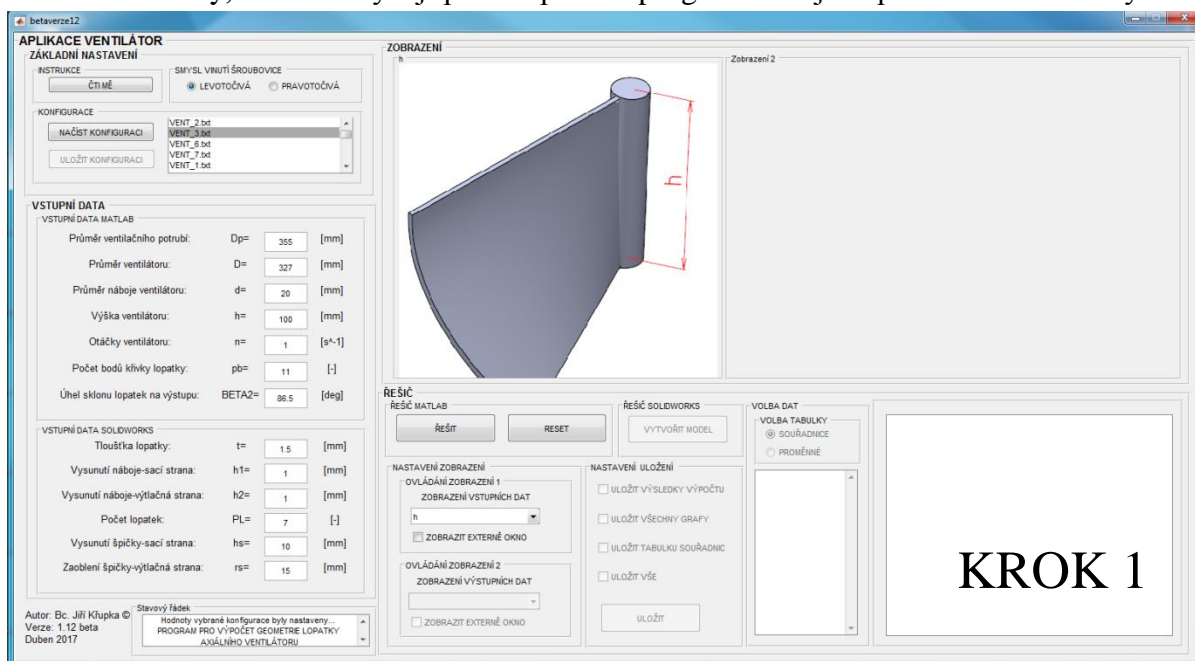
Obr. 110 Hlavní panel Zobrazení

**Panel zobrazení 1** - je plocha pouze pro zobrazení grafické nápovědy k některým zadávaným proměnným. Přepínání obrázku se provádí na hlavním panelu 3 - **Řešič**.

**Panel zobrazení 2** - je plocha pro zobrazení jednotlivých grafů po provedení výpočtu. Přepínání grafů se provádí na hlavním panelu 3-**Řešič**.

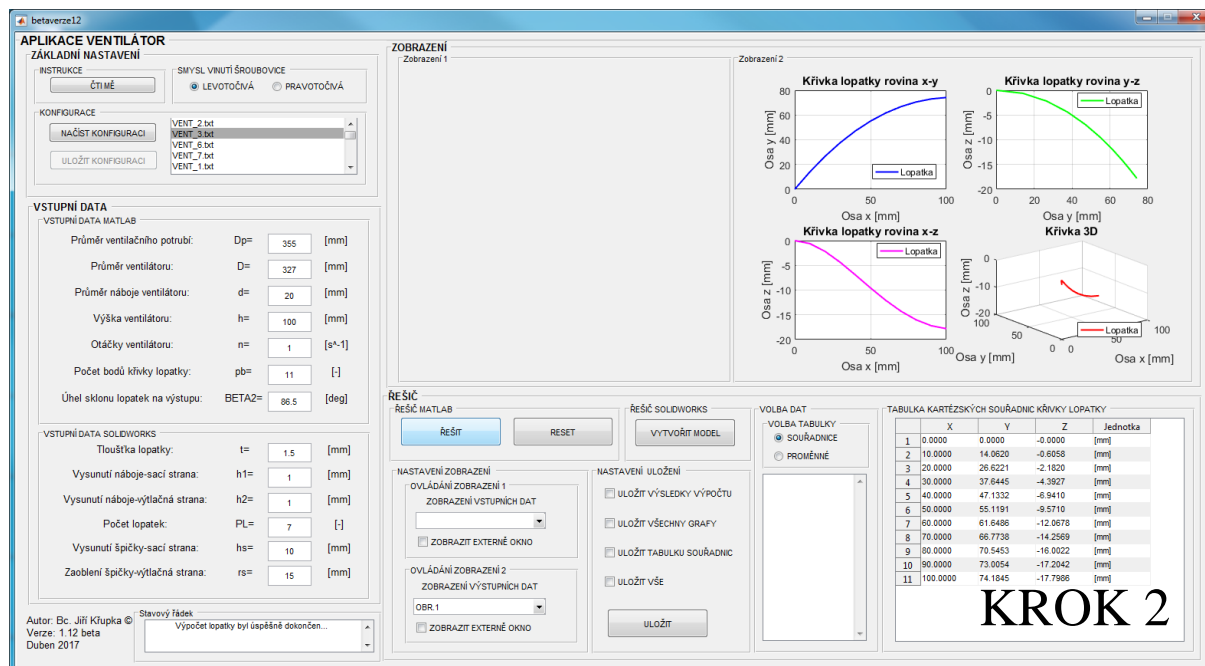
### 3.2.2.5 UKÁZKA FUNKCE APLIKACE:

Na obrázcích níže je proveden výpočet lopatky ventilátoru v aplikaci **VENTILATOR**. Jednotlivé kroky, které zachycují průběh práce s programem a jsou příslušně očíslovány.



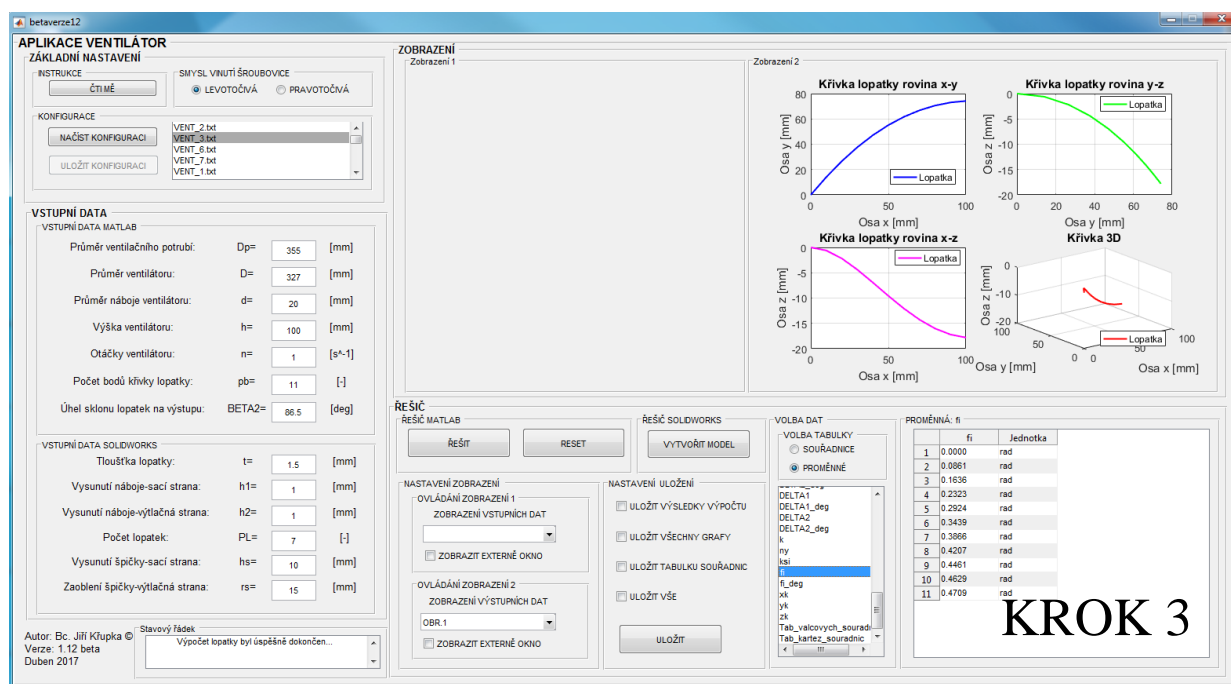
Obr. 111 Ukázka funkce aplikace VENTILATOR - krok 1

Na Obr. 111 je zobrazen stav po vybrání základního nastavení, zadání vstupních parametrů a zobrazení grafické nápovědy.

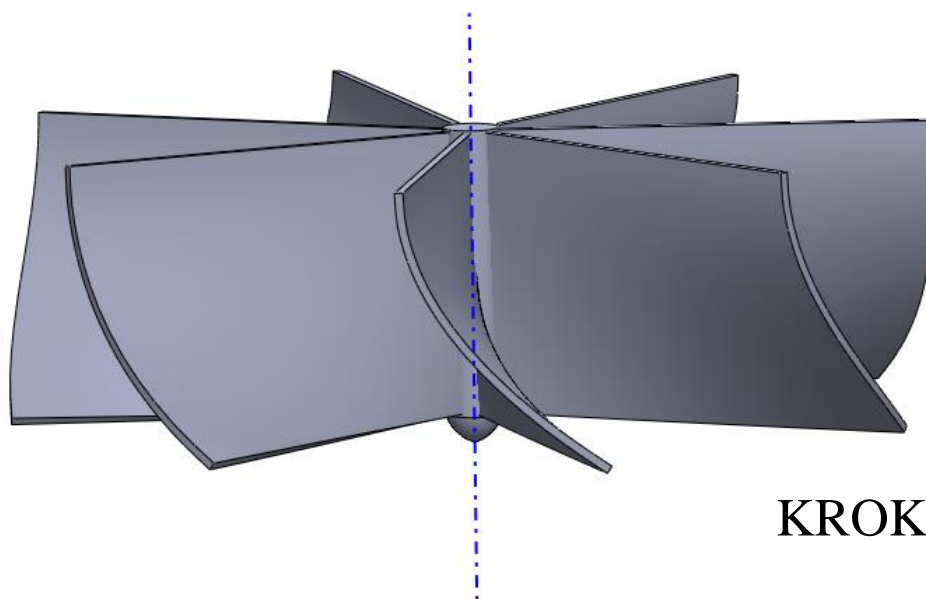


Obr. 112 Ukázka funkce aplikace VENTILATOR - krok 2

Na Obr. 112 je zobrazen stav po stisku *pushbutton* „ŘEŠIT“, tedy po provedení výpočtu, vykreslení grafů a umožnění volby uložení dat. Dále na Obr. 113 je zobrazen stav při listování mezi vypočtenými proměnnými a grafy. Posledním krokem je stisknutí *pushbutton* „VYTVOŘIT MODEL“, po kterém dojde ke spuštění aplikace Solidworks a vygenerování modelu ventilátoru viz Obr. 114.



Obr. 113 Ukázka funkce aplikace VENTILATOR - krok 3



KROK 4

*Obr. 114 Ukázka funkce aplikace VENTILATOR - krok 4*

## ZÁVĚR

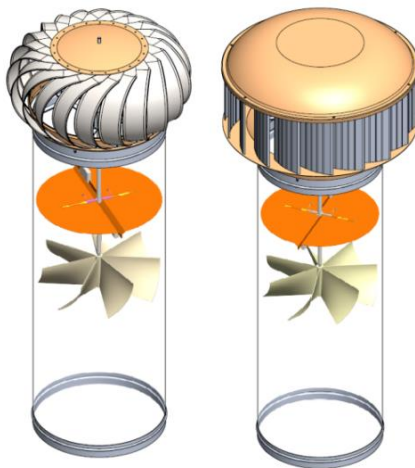
Vypracovanou diplomovou práci tvoří dvě hlavní části. Jednak je to rešeršní část a dále pak je to praktická (konstrukční - návrhová) část. Obě tyto části jsou vůči rozsahu jednotlivých kapitol práce k sobě v poměru přibližně 1: 2, kde převažuje praktická část.

Prvním cílem diplomové práce bylo vytvoření rešeršní zprávy, která je zaměřena na historii, konstrukci ventilačních turbín a světové výrobce ventilačních turbín, ventilačních hlavic a příslušenství. Tento cíl byl splněn. Navíc byla tato část (kapitola 1. Ventilační turbíny) rozšířena o podkapitoly zabývající se dopravovaným médiem ventilačních turbín (kapitola - 1.1) z termomechanického pohledu a možnostmi ventilace staveb ( kapitola - 1.3).

Druhým cílem diplomové práce bylo vytvoření 3D modelů alternativních stavebnicových regulovatelných ventilačních turbín dle podkladů vedoucího. Konkrétně byly vytvořeny 3D modely pro dva typy ventilačních turbín. A to pro typ *Edmonds Hurricane* a *VYTOZ-EKO ZLT*. Pro oba uvedené typy ventilačních turbín byla použita mechanická regulace tzv. *čtvrt-klapkou* a *půl-klapkou*. 3D modely respektive, sestavy mechanických regulačních klapek jsou součástí obou typů ventilačních turbín. Celkem tak vznikly čtyři sestavy. V podkapitolách, které se věnují jednotlivým dílům, je uvedena jejich funkce, popřípadě dílčí parametry a postup k jejich vytvoření v softwaru Solidworks. Obdobně je tomu u dílů mechanické regulace čtvrt-klapkou a půl-klapkou. Výsledkem práce v této části jsou kapitoly 2.1.4 a 2.2.4 , které se věnují 3D sestavám obou typů turbín a nabízejí kromě celkových pohledů na oba typy i některé jejich detaily, včetně naznačení funkce mechanické regulace. Tímto byl i druhý cíl práce splněn.

Třetím cílem diplomové práce bylo vytvořit systém výpočtu tvarů lopatek axiálního ventilátoru vzhledem k proudění vzduchu. Úvodem do této problematiky je kapitola 3.1.1, která je věnována teorii axiálních ventilátorů i když použitý ventilátor má některé odlišnosti oproti klasické koncepci. V kapitole 3.1.2 je proveden výpočet rychlostních trojúhelníků, po jejichž vyřešení lze stanovit souřadnice křivky lopatky ventilátoru a následně tyto data implementovat do softwaru Solidworks viz kapitola 3.1.3. Tímto byl splněn i poslední cíl práce. Navíc byla vytvořena vlastní softwarová aplikace v prostředí softwaru MATLAB (kapitola-3.2), která umožňuje automatizovat provedený výpočet tvaru lopatky ventilátoru a tím zkracuje čas při jejím návrhu.

Součástí příloh je zobrazení sestav obou typů ventilačních turbín v předním a v izometrickém pohledu spolu s příslušnými detaily, fotografie obou typů ventilačních turbín a dále pak schéma rozložení grafického okna vlastní aplikace VENTILATOR. Při tvorbě diplomové práce bylo využito softwaru: MS Word, MS Excel, Solidworks a MATLAB.



Obr. 115 Ventilační turbína. a) VYTOZ-EKO ZLT. b) Edmonds Hurricane

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BORECKÁ, Květoslava, Ludmila CHVALINOVÁ, Mája LOVEČKOVÁ a Veronika ŠMÍDOVÁ-ROUŠAROVÁ. *Konstruktivní geometrie*. 2. vyd. Brno: CERM, 2006, 141 s. ISBN 80-214-3229-2
- [2] ČERMÁK, Jan a kolektiv. *Ventilátory*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1974, 410 s.
- [3] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika 1: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 2. vyd. Brno/Praha: VUTUM, 2013, 576 s. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [4] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika 2: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 2. vyd. Brno/Praha: VUTUM, 2013, 670 s. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [5] HLUCHÝ, Miroslav, Jan KOLOUCH a Rudolf PAŇÁK. *Strojírenská technologie 2: polotovary a jejich technologičnost*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2001, 313 s. ISBN 80-7183-244-8
- [6] JANÍČEK, Přemysl, Zdeněk FLORIÁN. *Mechanika těles: Úlohy z pružnosti a pevnosti I*. 3. vyd. Brno: CERM, 2010, 170 s. ISBN 978-80-214-4122-4
- [7] JANÍČEK, Přemysl, Emanuel ONDRÁČEK a Jan VRBKA. *Mechanika těles: pružnost a pevnost*. 2. vyd. Brno: CERM, 2004, 287 s. ISBN 80-214-0468-x
- [8] JEŘÁBEK, Antonín. *Stavba a provoz strojů: strojní součásti 1*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2006, 214 s. ISBN 80-86960-02-1
- [9] KLETEČKA, Jaroslav a Petr FOŘT. *Technické kreslení*. 1. vyd. Brno: CP books, 2005, 252 s. ISBN 80-251-0498-2
- [10] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. dopl. vyd. Praha: Albra, 2005, 914 s. ISBN 80-7361-033-7.
- [11] NOVÝ, Richard. *Ventilátory*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 101 s. ISBN 80-01-02385-0
- [12] PAVELEK, Milan a kolektiv. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: CERM, 2011, 192 s. ISBN 978-80-214-4300-6
- [13] PŘIKRYL, Karel. *Kinematika*. 5. vyd. Brno: CERM, 2008, 142 s. ISBN 978-80-214-3679-4
- [14] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu 2*. 2. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3
- [15] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

- [16] SKOPAL, Vlastimil, Jindřich ADÁMEK a Mojmír HOFÍREK. *Stavba a provoz strojů IV: konstrukční uspořádání, provoz a údržba*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1982, 424 s. ISBN 04-235-82
- [17] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS, Jiří DVOŘÁČEK a František PROKEŠ. *Základy konstruování*. 4. vyd. Brno: CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-750-5
- [18] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a František PROKEŠ. *Výběry z norem*. 4. vyd. Brno: CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-751-2
- [19] ŠOB, František. *Hydromechanika*. 2. vyd. Brno: CERM, 2008, 238 s. ISBN 978-80-214-3578-0
- [20] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: tvorba uživatelských aplikací*. 1.vyd. Praha: BEN, 215 s. ISBN 80-7300-133-0
- [21] ČSN 12 7010. *Vzduchotechnická zařízení: Navrhování větracích a klimatizačních zařízení: Obecná ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2014. 28 s.
- [22] ČSN EN 13779. *Větrání nebytových budov: Základní požadavky na větrací a klimatizační systémy*. Praha: Český normalizační institut, 2010. 64 s.
- [23] ČSN EN 15242. *Větrání budov: Výpočtové metody pro stanovení průtoku vzduchu v budovách včetně infiltrace*. Praha: Český normalizační institut, 2013. 44 s.
- [24] ČSN EN 15251. *Vstupní parametry vnitřního prostředí pro návrh a posouzení energetické náročnosti budov s ohledem na kvalitu vnitřního vzduchu, tepelného prostředí, osvětlení a akustiky*. Praha: Český normalizační institut, 2011. 44 s.
- [25] CORY, William. *Fans & Ventilation: a practical guide*. 1. vyd. Amsterdam: Elsevier, 2005, 424 s. ISBN 0-080-44626-4. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://books.google.cz>
- [26] VUT FAST: *TZB*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubinova.o/prednasky/A\\_VZT%2008\\_09.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubinova.o/prednasky/A_VZT%2008_09.pdf)
- [27] Dassault systemes: *Solidworks Help*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.help.solidworks.com/HelpProducts.aspx>
- [28] EDMONDS: *Ventilační turbíny EDMONDS*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.ventilacniturbiny.cz>
- [29] GOOGLE: *Patents*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.google.cz/patents/US185776>
- [30] GOOGLE: *Ventilační turbíny*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.google.cz>
- [31] H-tech group: *Ventilační turbíny H-tech group*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.vetrani.com>

- [32] LOMANCO: *Ventilační turbíny LOMANCO*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: <https://www.lomanco.cz>
- [33] Math Works: *MALTAB Help*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: [https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html?s\\_tid=gn\\_loc\\_drop](https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html?s_tid=gn_loc_drop)
- [34] MITCalc: *Zkrutná pružina*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: <http://mitcalc.com/doc/springs/help/cz/springstxt.htm>
- [35] MŮJDŮM: *Ventilační turbína větrá zadarmo*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: [www.mujdum.duabyt.cz/rubriky/stavba/ventilacni-turbina-vetra-zadarmo\\_322.html](http://www.mujdum.duabyt.cz/rubriky/stavba/ventilacni-turbina-vetra-zadarmo_322.html)
- [36] Royal Metrological society: *Beaufortova stupnice*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: <https://www.rmets.org/weather-and-climate/observing/beaufort-scale>
- [37] VYTOZ-EKO: *Ventilační turbíny VYTOZ-EKO*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: <https://www.vytozeko.cz>
- [38] Wikipedie: *Beaufortova stupnice*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Beaufortova\\_stupnice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Beaufortova_stupnice)
- [39] Wikipedie: *Simulace CFD*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics)
- [40] Wikipedie: *Definice ppm*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Parts\\_per\\_million](https://cs.wikipedia.org/wiki/Parts_per_million)
- [41] Wikipedie: *Stupnice kvality vzduchu*. [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ventilation\\_\(architecture\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ventilation_(architecture))



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Veličina	Jednotka
$A$	Práce	$[J]$
$c$	Měrná tepelná kapacita	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_1$	Absolutní rychlost na vstupu	$[m \cdot s^{-1}]$
$c_2$	Absolutní rychlost na výstupu	$[m \cdot s^{-1}]$
$c_{u1}$	Abs. složka rychlosti ve směru unášivém na vstupu	$[m \cdot s^{-1}]$
$c_{u2}$	Abs. složka rychlosti ve směru unášivém na výstupu	$[m \cdot s^{-1}]$
$C$	Poměr vinutí	$[-]$
$c_{m1}$	Meridiální složka absolutní rychlosti na vstupu	$[m \cdot s^{-1}]$
$c_{m2}$	Meridiální složka absolutní rychlosti na výstupu	$[m \cdot s^{-1}]$
$c_p$	Měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_v$	Měrná tepelná kapacita za stálého objemu	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$\varnothing d$	Průměr drátu pružiny	$[mm]$
	Průměr náboje ventilátoru	$[mm]$
$\varnothing d_i$	Vnitřní průměr pružiny	$[mm]$
$\varnothing d_h$	Průměr hřídele turbíny	$[mm]$
$\varnothing d_{kl}$	Průměr otvoru pro osu klapky v hřídeli	$[mm]$
$\varnothing D$	Vnější průměr pružiny	$[mm]$
	Průměr oběžného kola ventilátoru	$[mm]$
$\varnothing D'_s$	Střední průměr pružiny zatížené max. momentem	$[mm]$
$\varnothing D_H$	Průměr sacího hrdla turbíny	$[mm]$
$\varnothing D'_i$	Vnitřní průměr pružiny zatížené max. momentem	$[mm]$
$\varnothing D_p$	Průměr ventilačního potrubí	$[mm]$
	Průměr vodícího trnu pružiny	$[mm]$
$\varnothing D_s$	Střední průměr pružiny	$[mm]$
$E$	Modul pružnosti v tahu drátu pružiny	$[MPa]$
$F_p$	Síla pružiny	$[N]$
$F_{ods}$	Odstředivá síla	$[N]$
$g$	Tíhové zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
$h$	Výška lopatky ventilátoru	$[mm]$
$h_1$	Délkový přírůstek k výšce lopatky $h$ na sací straně	$[mm]$
$h_2$	Délkový přírůstek k výšce lopatky $h$ na výtlačné straně	$[mm]$

Symbol	Veličina	Jednotka
$h_{celk}$	Celková výška ventilátoru	[ mm ]
$h_s$	Výška zaoblení náboje na vstupní straně	[ mm ]
$k_p$	Kompresní poměr	[ – ]
$k$	Směrnice přímky	[ mm <sup>-1</sup> ]
$k'$	Momentová tuhost pružiny	[ N · mm <sup>-1</sup> ]
$K_i$	Součinitel zohledňující vliv zakřivení závitů pružiny	[ – ]
$L_1$	Délka pracovního ramene	[ mm ]
$L_2$	Délka opěrného ramene	[ mm ]
$L_p$	Délka modelu potrubí	[ mm ]
$L_s$	Délka těla pružiny	[ mm ]
$m_v$	Hmotnost vývažku	[ kg ]
$M$	Střední zdánlivá molární hmotnost	[ kg · kmol <sup>-1</sup> ]
	Ohybový moment od zatížení pružiny	[ N · mm ]
$M_{omax}$	Maximální ohybový moment pružiny	[ N · mm ]
$n$	Látkové množství	[ mol ]
	Otáčky hřídele turbíny-otáčky ventilátoru	[ s <sup>-1</sup> ]
	Počet celých činných závitů zkrutné pružiny	[ – ]
$n'_a$	Redukovaný počet činných závitů pružiny	[ – ]
$n_b$	Celkový počet činných závitů pružiny	[ – ]
$n_p$	Neceločíselná část počtu činných závitů pružiny	[ – ]
$n_1$	Otáčky hřídele turbíny pro klapku v poloze otevřeno	[ s <sup>-1</sup> ]
$n_2$	Otáčky hřídele turbíny pro klapku v mezi-poloze	[ s <sup>-1</sup> ]
$n_3$	Otáčky hřídele turbíny pro klapku v poloze zavřeno	[ s <sup>-1</sup> ]
$p$	Tlak plynu	[ Pa ]
$p_1$	Tlak plynu na počátku termomechanického děje	[ Pa ]
$p_2$	Tlak plynu na konci termomechanického děje	[ Pa ]
$p_A$	Atmosférický tlak	[ Pa ]
$p_b$	Počet bodů křivky	[ – ]
$\Delta p_{cv}$	Celkový tlak ventilátoru	[ Pa ]
$p_L$	Počet lopatek ventilátoru	[ – ]
$p_p$	Parciální tlak vodní páry	[ Pa ]
$p''_p$	Parciální tlak syté páry	[ Pa ]
$\Delta p_s$	Rozdíl statických tlaků vnějším průměru kola	[ Pa ]

Symbol	Veličina	Jednotka
$\Delta p_{tEULER}$	Teoretický Eulerův tlak	[ Pa ]
$\Delta p_z$	Tlaková ztráta ventilátoru	[ Pa ]
$P_{mv}$	Výkon (pohonu) elektromotoru ventilátoru	[ W ]
$P_v$	Vzduchový výkon ventilátoru	[ W ]
$q$	Koeficient	[ – ]
$Q$	Teplo	[ J ]
$Q_V$	Odsávací výkonnost turbíny	[ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]
	Odsávací výkonnost turbíny	[ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]
$r$	Měrná plynová konstanta	[ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$r_s$	Poloměr zaoblení náboje na vstupní straně	[ mm ]
$r_v$	Vzdálenost vývažku od osy rotace	[ mm ]
$r_k$	Poloměr klapky	[ mm ]
$R$	Univerzální plynová konstanta	[ $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
	Poloměr oběžného kola ventilátoru	[ mm ]
$R_e$	Mez kluzu v tahu drátu pružiny	[ MPa ]
$R_{mAl}$	Mez pevnosti hliníku	[ MPa ]
$R_{MAX}$	Poloměr na konci lopatky	[ mm ]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu drátu pružiny	[ MPa ]
$S$	Průtočná plocha ventilátoru	[ $mm^2$ ]
$s_t$	Mezera mezi ventilátorem a potrubím	[ mm ]
$t$	Teplota vzduchu okolí	[ °C ]
	Tloušťka lopatky	[ mm ]
$t_d$	Šírka drážky pro připojení statického ramena	[ mm ]
$t_s$	Tloušťka stěny plechu	[ mm ]
$t_p$	Teplota vzduchu	[ °C ]
$\Delta t_p$	Rozdíl teplot vzduchu	[ °C ]
$T$	Absolutní teplota plynu	[ K ]
$u_1$	Unášivá rychlost ventilátoru na vstupu	[ $m \cdot s^{-1}$ ]
$u_2$	Unášivá rychlost ventilátoru na výstupu	[ $m \cdot s^{-1}$ ]
$v_w$	Rychlost větru	[ $m \cdot s^{-1}$ ]
$V$	Objem plynu	[ $m^3$ ]
$w_1$	Relativní rychlost na vstupu	[ $m \cdot s^{-1}$ ]
$w_2$	Relativní rychlost na výstupu	[ $m \cdot s^{-1}$ ]

Symbol	Veličina	Jednotka
$w_{u1}$	Unášivá složka relativní rychlosti na vstupu	$[m \cdot s^{-1}]$
$w_{u2}$	Unášivá složka relativní rychlosti na výstupu	$[m \cdot s^{-1}]$
$x_k$	Souřadnice lopatky ve směru osy x	$[mm]$
$y_k$	Souřadnice lopatky ve směru osy y	$[mm]$
$z_k$	Souřadnice lopatky ve směru osy z	$[mm]$
$\alpha$	Úhel ramen ve stavu plně zatíženém	$[^\circ]$
$\alpha_1$	Úhel vstupu absolutní rychlosti do ventilátoru	$[^\circ]$
$\alpha_2$	Úhel výstupu absolutní rychlosti z ventilátoru	$[^\circ]$
$\beta$	Úhel mezi pracovním a opěrným ramenem ve volném	$[^\circ]$
	Úhel sklonu lopatek	$[^\circ]$
$\beta_1$	Úhel sklonu lopatek na vstupu	$[^\circ]$
$\beta_2$	Úhel sklonu lopatek na výstupu	$[^\circ]$
$\delta_1$	Úhel tečny lopatky na vstupu	$[^\circ]$
$\delta_2$	Úhel tečny lopatky na výstupu	$[^\circ]$
$\Delta$	Vůle mezi vnitř. průměrem pružiny a vodícím trnem	$[mm]$
$\eta_{cv}$	Celková účinnost ventilátoru	$[-]$
$\lambda$	Nábojový poměr ventilátoru	$[-]$
$\rho_{Al}$	Hustota hliníku	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\rho_{sv}$	Hustota suchého vzduchu	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\rho_{vp}$	Hustota vodní páry	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\rho_v$	Hustota vzdušiny	$[kg \cdot m^{-3}]$
$v$	Souřadnice lopatky ve směru osy rotace	$[mm]$
$\xi$	Souřadnice lopatky kolmá k ose rotace (délka oblouku)	$[mm]$
$\xi_{MAX}$	Maximální hodnota délky oblouku lopatky	$[mm]$
$\varphi$	Úhlová délka oblouku lopatky	$[rad]; [^\circ]$
$\theta$	Úhlová výchylka pracovního ramena	$[^\circ]$
$\theta'_c$	Úhlová výchylka pracovního ramena	$[^\circ]$
$\theta'_t$	Celková úhlová výchylka pracovního ramena	$[^\circ]$
$\theta_u$	Mezní úchylka úhlu ramen ve volném stavu	$[^\circ]$
$\sigma_o$	Ohybové napětí v drátu pružiny	$[MPa]$
$\sigma_{oD}$	Dovolené ohybové napětí v drátu pružiny	$[MPa]$
$\tau$	Bezrozměrný parametr poměru rychlostí	$[-]$

**SEZNAM OBRÁZKŮ:**

Obr. 1 Ventilační turbína [30] .....	11
Obr. 2 Aplikace ventilační turbíny [30].....	11
Obr. 3 Schéma množství vzduchu / osoba.....	17
Obr. 4 Moderní konstrukce ventilační turbíny [32].....	20
Obr. 5 První ventilační turbína-autor Vaughn H. Meadows [29].....	20
Obr. 6 Řez ventilační turbínou [32].....	21
Obr. 7 Logo firmy Lomanco [32].....	23
Obr. 8 Lomanco IB8+VP8 komplet [32].....	23
Obr. 9 Aplikace typu Lomanco BIB 14 [32] .....	24
Obr. 10 Typ Lomanco GT 12 [32] .....	24
Obr. 11 Zobrazení výkonnosti turbín Lomanco [32].....	25
Obr. 12 Odsávací výkonnost turbín Lomanco [32] .....	25
Obr. 13 Logo firmy Edmonds [28].....	26
Obr. 14 Edmonds typ SUPAVENT 250 [28] .....	27
Obr. 15 Edmonds typ TURBOVENTURA 150 [28] .....	27
Obr. 16 Edmonds typ SUWERVENT 150 [28] .....	27
Obr. 17 Edmonds typ WINDMASTER 300 [28].....	27
Obr. 18 Edmonds typ HURRICANE [28].....	28
Obr. 19 Edmonds typ HURRICANE schéma- základní rozměry [28].....	28
Obr. 20 Aplikace typ SUPAVENT 250 [28].....	30
Obr. 21 Aplikace typ WINDMASTER 300 [28].....	30
Obr. 22 Logo firmy VYTOZ-EKO [37].....	31
Obr. 23 Aplikace ventilační turbíny ZLT [37] .....	31
Obr. 24 Ventilační turbína ZLT [37] .....	31
Obr. 25 Logo firmy H-tech group [31].....	32
Obr. 26 Aplikace turbíny H-tech typ HV [31].....	32
Obr. 27 Aplikace turbíny typu H-tech typ VV [31] .....	32
Obr. 28 Regulační lámací klapka [37].....	34
Obr. 29 Elektrický ventilátor [37] .....	34
Obr. 30 Prostředí softwaru Solidworks .....	36
Obr. 31 Model potrubí-tvorba spirály .....	37
Obr. 32 Render potrubí.....	37
Obr. 33 Tvorba modelu horní a dolní obruč Edmonds Hurricane.....	38
Obr. 34 Model horní a dolní obruč Edmonds Hurricane.....	38
Obr. 35 Tvorba modelu rotor Edmonds Hurricane .....	39
Obr. 36 Model dolní kotouč Edmonds Hurricane - horní pohled.....	39
Obr. 37 Model dolní a horní kotouč Edmonds Hurricane; 1 – dolní kotouč, 2 – horní kotouč.....	39
Obr. 38 Proudnic v radiálním oběžném kole [2] .....	40
Obr. 39 Schéma konstrukce střednice lopatky ve tvaru kruhového oblouku [2] .....	40
Obr. 40 Model lopatky turbíny Edmonds Hurricane-horní pohled .....	40
Obr. 41 Model lopatky turbíny Edmonds Hurricane.....	40
Obr. 42 Model hřídel turbíny Edmonds Hurricane.....	41
Obr. 43 Model ramen turbíny Edmonds Hurricane; 1 – otočné rameno; 2 – statické rameno.....	41
Obr. 44 Tvorba modelu půl-domek turbíny Edmonds Hurricane .....	42
Obr. 45 Model půl-domku ložiskového domečku turbíny Edmonds Hurricane .....	42
Obr. 46 Model střecha turbíny Edmonds Hurricane.....	43

Obr. 47 Rozložená sestava-mechanická čtvrt-klapka; 1,2 – plech čtvrt-klapka; 3 – vývažek; 4 – mosazná trubka; 5 – nerezová osa .....	43
Obr. 48 Základní rozměry plechu čtvrt klapky.....	44
Obr. 49 Sestava osa klapky-nerezová osa .....	44
Obr. 50 Sestava osa klapky-mosazná trubka .....	44
Obr. 51 Model vývažek klapky-izometrický pohled .....	45
Obr. 52 Model vývažek klapky .....	45
Obr. 53 Rozložená sestava-mechanická půl-klapka; 1, 2 – plech půl-klapka; 3 – zkrutná pružina; 4 – nerezová osa; 5 – mosazná trubka; 6 - vývažek .....	45
Obr. 54 Sestava půl klapky-izometrický pohled .....	46
Obr. 55 Model půl-klapka .....	47
Obr. 56 Model půl-klapka (detail vytvoření prolisu) .....	47
Obr. 57 Obecné schéma zkrutné pružiny.....	52
Obr. 58 Zkrutná pružina-pohled přední .....	54
Obr. 59 Zkrutná pružina-pohled pravý .....	54
Obr. 60 Model zkrutné pružiny .....	54
Obr. 61 Poloha čtvrt-klapky. a) otevřeno, b) obecná mezi-poloha, c) uzavřeno.....	55
Obr. 62 Poloha půl-klapky. a) otevřeno, b) obecná mezi-poloha, c) uzavřeno .....	55
Obr. 63 Detail-uložení hřídele Edmonds Hurricane; 3 – ložisko .....	56
Obr. 64 Detail-vnitřní část Edmonds Hurricane; 1 – otočné rameno; 2 – statické rameno .....	56
Obr. 65 Sestava turbíny Edmonds Hurricane. a) přední pohled s čtvrt-klapkou. b) přední pohled s půl-klapkou. c) izometrický pohled s čtvrt-klapkou. ....	56
Obr. 66 Model límec – VYTOZ-EKO ZLT .....	57
Obr. 67 Render lopatka VYTOZ-EKO ZLT .....	58
Obr. 68 Konce lopatky model VYTOZ-EKO ZLT. a) horní konec; b ) spodní konec .....	58
Obr. 69 Řez modelem střecha – VYTOZ-EKO ZLT .....	59
Obr. 70 Model střecha VYTOZ-EKO ZLT – aplikace prvku přidání rotací.....	59
Obr. 71 Render dílu čtvrt-klapka.....	59
Obr. 72 Render dílu půl-klapka .....	60
Obr. 73 Detail-vnitřní část VYTOZ-EKO ZLT; 1 – otočné rameno; 2 – statické rameno .....	60
Obr. 74 Detail-vnitřní část VYTOZ-EKO ZLT; 3 – ložisko.....	60
Obr. 75 Sestava turbíny VYTOZ-EKO ZLT. a) přední pohled s čtvrt-klapkou. b) přední pohled s půl-klapkou. c) izometrický pohled s půl-klapkou. ....	61
Obr. 76 Schéma jednostupňového a dvoustupňového axiálního ventilátoru [2] .....	63
Obr. 77 Schéma průtoku oběžným kolem axiálního ventilátoru [2] .....	63
Obr. 78 Porovnání rychlostních a tlakových poměrů. a) u přetlakových. b) u rovnotlakých ventilátorů [16] .....	64
Obr. 79 Axiální ventilátor pouze s oběžným kolem. [2] a) schématický osový řez. b) válcový řez lopatkovou mříží. c) rychlostní trojúhelníky .....	65
Obr. 80 Porovnání rychlostních a tlakových poměrů. a) u přetlakových. b) rovnotlakých ventilátorů [16] .....	65
Obr. 81 Ventilátor bez satorových lopatek [11] .....	65
Obr. 82 Oběžná kola ventilátorů. a) s dopředu zahnutými lopatkami. b) s radiálně ukončenými lopatkami. c) s dozadu zahnutými lopatkami [11] .....	66
Obr. 83 Schéma lopatky v potrubí – rychlostní trojúhelník sací strana .....	67
Obr. 84 Rychlostní trojúhelník-sací strana ventilátoru.....	68
Obr. 85 Rychlostní trojúhelník-výtaková strana ventilátoru $\beta_2 < 90^\circ$ .....	69
Obr. 86 Tvar lopatky a její úhlové závislosti .....	73
Obr. 87 Půdorys ventilátoru-lopatka .....	74

Obr. 88 Převod válcových souřadnic na kartézské souřadnice. ....	75
Obr. 89 3D křivka lopatky ventilátoru.....	76
Obr. 90 Křivka lopatky ventilátoru v jednotlivých rovinách.....	76
Obr. 91 Kontrola souřadnic 3D modelu lopatky .....	77
Obr. 92 Axiální ventilátor ve ventilačním potrubí .....	77
Obr. 93 Model lopatka ventilátoru .....	77
Obr. 94 Model axiální ventilátor. ....	78
Obr. 95 Model axiální ventilátor izometrický pohled .....	78
Obr. 96 Aplikace VENTILATOR-grafické okno programu .....	79
Obr. 97 Šroubovice pravotočivá [1] .....	80
Obr. 98 Hlavní panel Základní nastavení .....	80
Obr. 99 Panel Vstupní data pro MATLAB .....	81
Obr. 100 Panel Vstupní data pro Solidworks .....	82
Obr. 101 Grafická nápověda proměnná $rs$ .....	82
Obr. 102 Grafická nápověda proměnná $hs$ .....	82
Obr. 103 Panel Řešič MATLAB a Solidworks .....	83
Obr. 104 Hlavní panel Řešič.....	83
Obr. 105 Panel Nastavení zobrazení.....	84
Obr. 106 Pomocný hlavní panel Stavový řádek .....	84
Obr. 107 Panel Volba dat a Tabulka.....	84
Obr. 108 Panel Nastavení uložení .....	85
Obr. 109 Ukládaná data VENTILATOR.....	85
Obr. 110 Hlavní panel Zobrazení .....	86
Obr. 111 Ukázka funkce aplikace VENTILATOR - krok 1.....	86
Obr. 112 Ukázka funkce aplikace VENTILATOR - krok 2.....	87
Obr. 113 Ukázka funkce aplikace VENTILATOR - krok 3.....	87
Obr. 114 Ukázka funkce aplikace VENTILATOR - krok 4.....	88
Obr. 115 Ventilační turbína. a) VYTOZ-EKO ZLT. b) Edmonds Hurricane .....	89



## SEZNAM GRAFŮ:

Graf. 1 Odsávací výkonnost v závislosti na rychlosti větru .....	30
Graf. 2 Závislost ohybového napětí $\sigma$ na úhlové výchylce pracovního ramene $\theta$ .....	53
Graf. 3 Závislost rychlostí na změně úhlu sklonu lopatky na výstupu $\beta_2$ .....	70
Graf. 4 Závislost tlaku $\Delta p$ ventilátoru na změně otáček $n$ .....	72

**SEZNAM TABULEK:**

Tab. 1 Složení suchého vzduchu [12].....	12
Tab. 2 Základní fyzikální veličiny pro suchý vzduch [12], [4] .....	12
Tab. 3 Základní fyzikální hodnoty pro vodní páru [12], [4].....	12
Tab. 4 Beaufortova stupnice [36], [38].....	15
Tab. 5 Příklad ventilace budovy .....	17
Tab. 6 Označení a specifikace vybraných typů vzduchu v technické dokumentaci [22].....	18
Tab. 7 Klasifikace tříd odváděného vzduchu (ETA) a odpadního vzduchu (EHA) [22] .....	18
Tab. 8 Provedení turbíny Lomanco IB 8, VP8 [32] .....	23
Tab. 9 Provedení turbíny Lomanco BIB 12 a BIB 14 [32] .....	24
Tab. 10 Porovnání odsávací výkonnosti Edmonds typ HURRICANE [28] .....	28
Tab. 11 Edmonds TURBO VENTURA 150 [28] .....	29
Tab. 12 Edmonds SUPAVENT 250 [28] .....	29
Tab. 13 Edmonds SEWER VENT 150 [28].....	29
Tab. 14 Edmonds WINDMASTER 300 [28] .....	29
Tab. 15 Porovnání odsávací výkonnosti VYTOZ-EKO typ ZLT [37].....	31
Tab. 16 Porovnání odsávací výkonnosti H-tech group typ VV [31] .....	33
Tab. 17 Tabulka vstupních dat VYTOZ-EKO [37].....	66
Tab. 18 Tabulka válcových souřadnic $v, \xi, \varphi$ .....	74
Tab. 19 Tabulka převedených kartézských souřadnic $x, y, z$ .....	76
Tab. 20 Vstupní data pro MATLAB .....	81
Tab. 21 Vstupní data pro Solidworks .....	82

## SEZNAM PŘÍLOH

- Pohledy sestavy:	EDMONDS HURRICANE	2-5oADI9-00/00
- Pohledy sestavy:	VYTOZ-EKO ZLT	2-5oADI9-01/01
- Pohledy sestavy (ISO pohled):	VENTILAČNÍ TURBÍNY	2-5oADI9-02/02
- Fotografie:	EDMONDS HURRICANE	4-5oADI9-00/01
- Fotografie:	VYTOZ-EKO ZLT	4-5oADI9-01/02
- Grafické okno aplikace:	VENTILATOR GUI	4-5oADI9-03/03